

NICODEMOS HENRIQUE DA SILVA CONI

**Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à
Quente e Galvalume® produzidos na CSN-PR**

**Dissertação apresentada ao PIPE -
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia, Área de Concentração:
Engenharia e Ciências dos Materiais,
Universidade Federal do Paraná, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia.**

**Orientador: Prof. Paulo Victor Prestes
Marcondes**

**Co-Orientador: Profª Ana Sofia C. M.
D'Oliveira**

**CURITIBA
2004**

A minha mãe, pelo amor, carinho, compreensão
e palavra amiga nos momentos difíceis

Ao meu pai, a quem eu tanto admiro, por sua
sabedoria, humildade, amor e por ser meu grande
mestre durante toda a minha vida.

Ao meu filho, Talles, que peço a Deus, que cresça
como um homem de bem.

A Deus...

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes – meu orientador - pelo seu apoio, dedicação, motivação e orientação sempre presentes durante toda a realização deste trabalho e em grande parte fora do expediente de trabalho;

À Profª Ana Sofia – minha co-orientadora - por sua orientação, apoio e incentivo durante a realização deste trabalho;

Ao Eng. Márcio Frazão Guimarães Lins, Diretor Industrial da CSN-PR, por disponibilizar seu tempo e experiência adquirida, nas discussões a respeito dos resultados do trabalho;

Aos Professores Ramon, Silvio e Paulo Borges (CEFET/PR) que durante a apresentação para qualificação e defesa final deste trabalho, deixaram suas contribuições para a versão final;

À Companhia Siderúrgica Nacional e aos grandes profissionais e amigos que encontrei nesta empresa que representam, com certeza, o maior patrimônio que a CSN possui e que contribuíram para a minha formação industrial durante estes doze anos de trabalho;

A todos os operadores da Linha de Galvanização Contínua e técnicos de laboratório da Companhia Siderúrgica Nacional que contribuíram durante a coleta das amostras e realização dos ensaios mecânicos;

Aos amigos Algacir e Marcelo da Gonvarri que contribuíram na confecção dos corpos de prova para os ensaios de tração;

Aos amigos engenheiros e técnicos da CSN-PR, das Linhas de Produção, Manutenção e Engenharia de Produtos;

Ao tão sofrido e trabalhador Povo Brasileiro, que mesmo com os obstáculos do caminho, luta por dias melhores;

Vem, vamos embora
que esperar não é saber
Quem sabe, faz a hora
Não espera acontecer.

Geraldo Vandré

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
INTRODUÇÃO	1
1 REVESTIMENTOS RESISTENTES À CORROSÃO OBTIDOS PELO PROCESSO CONTÍNUO DE IMERSÃO À QUENTE	4
1.1 INTRODUÇÃO	4
1.2 PROCESSO DE IMERSÃO À QUENTE	6
1.3 PÓS - TRATAMENTOS	8
1.4 REVESTIMENTOS APLICADOS POR IMERSÃO À QUENTE	9
1.4.1 Revestimento Zincado	9
1.4.1.1 Microestrutura	9
1.4.1.2 Banho Metálico	10
1.4.1.3 Resistência a corrosão	12
1.4.1.4 Outras propriedades	14
1.4.2 Revestimento Zinco-Ferro	14
1.4.2.1 Microestrutura	15
1.4.3 Revestimento de Alumínio – Tipo 2	17
1.4.4 Revestimento de Alumínio – Tipo 1	17
1.4.5 Galfan – Liga Zn- 5%Al	19
1.4.6 Liga 55%Al-Zn (Galvalume®)	20
1.4.6.1 Microestrutura	20
1.4.6.2 Principais características e vantagens	21
1.4.6.2.1 Rendimento em área	22
1.4.6.2.2 Resistência a corrosão	22
1.4.6.2.3 Refletividade térmica	23
1.4.6.2.4 Resistência a altas temperaturas	24
2 LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA “DUAL PURPOSE” – CSN-PR	25
2.1 SEÇÃO DE ENTRADA	25
2.2 SEÇÃO DE LIMPEZA	25
2.3 FORNO DE RECOZIMENTO	26
2.4 POTES DE ZINCO E LIGA 55%Al-Zn	27
2.5 CONTROLE DE REVESTIMENTO	28
2.6 MINIMIZAÇÃO DE CRISTAIS	29
2.7 RESFRIAMENTO	29
2.8 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO	30
2.9 SEÇÃO DE TRATAMENTO QUÍMICO	30
2.10 SEÇÃO DE SAÍDA	31
3 ASPECTOS METALÚRGICOS	32
3.1 INTRODUÇÃO	32
3.2 RECOZIMENTO	35
3.2.1 Temperatura de Recristalização	38
3.2.2 Efeito da deformação na recristalização	39
3.2.3 Pureza do metal	40
3.3 ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO	40
3.4 EFEITO DA TEMPERATURA DE IMERSÃO E TAXA DE RESFRIAMENTO NO TEOR DE CARBONO EM SOLUÇÃO SÓLIDA DO AÇO BASE	41
4 ENSAIOS MECÂNICOS	43
4.1 INTRODUÇÃO	43
4.2 CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA	43
4.3 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA	45
4.4 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	46
4.5 PROPRIEDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO	46

4.5.1 Limite de Escoamento	46
4.5.2 Limite de Resistência à tração	47
4.5.3 Dutilidade	47
4.5.4 Resiliência	48
4.5.5 Tenacidade	49
4.6 CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA	50
4.7 PROPRIEDADES RELACIONADAS À CONFORMAÇÃO MECÂNICA	52
4.7.1 Coeficiente de Encruamento	53
4.7.2 Coeficiente de Anisotropia Normal – Coeficiente de Lankford	55
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	58
5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO E PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO	58
5.2 PARÂMETROS DE PROCESSO – LINHA DE GALVANIZAÇÃO	58
5.3 NORMAS TÉCNICAS PRODUTOS ZINCADOS E GALVALUME®	59
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	60
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
6.1 LIMITE DE ESCOAMENTO	63
6.2 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	70
6.3 ALONGAMENTO TOTAL	76
6.4 COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO	79
6.5 COEFICIENTE DE ANISOTROPIA	81
7 CONCLUSÕES	82
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE TABELAS

TABELA	1	-	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS LINHAS DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO À QUENTE DA CSN	2
TABELA	2	-	MASSA E ESPESSURA NOMINAIS DE REVESTIMENTOS PARA CHAPAS DE AÇO PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE IMERSÃO À QUENTE	5
TABELA	3	-	EFEITO DOS REVESTIMENTOS APLICADOS POR IMERSÃO À QUENTE NA VIDA DA PONTA DOS ELETRODOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR PONTOS	14
TABELA	4	-	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS DA LINHA DE GALVANIZAÇÃO DA CSN-PR	25
TABELA	5	-	SOLUBILIDADE DO CARBONO NO FERRO CCC EM EQUILÍBRIO COM Fe_3C EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	41
TABELA	6	-	VALORES DE n E K PARA MATERIAIS À TEMPERATURA AMBIENTE	54
TABELA	7	-	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GRAU 2710	58
TABELA	8	-	TEMPERATURAS DE LAMINAÇÃO E BOBINAMENTO A QUENTE E TAXA DE REDUÇÃO DO GRAU 2710	58
TABELA	9	-	PARÂMETROS DE PROCESSO – LINHA DE GALVANIZAÇÃO	59
TABELA	10	-	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PRODUTOS ZINCADOS E GALVALUME® - GRAUS COMERCIAIS - SEGUNDO NORMAS TÉCNICAS	59
TABELA	11	-	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA PREPARADOS EM FUNÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS E DIREÇÃO DO CORTE DOS MESMOS COM RELAÇÃO À DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO	60
TABELA	12	-	ESPESSURAS DOS CORPOS DE PROVA ESTUDADOS, SEUS PESOS DE REVESTIMENTO ESPECIFICADOS E MEDIDOS E ESPESSURAS CALCULADAS DOS REVESTIMENTOS	61
TABELA	13	-	SEQÜÊNCIA DE OPERAÇÕES DA PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS / INSTRUMENTOS UTILIZADOS ...	62
TABELA	14	-	EQUAÇÕES PARA O LIMITE DE ESCOAMENTO ESPECÍFICO PARA O GALVALUME® PARA AS CHAPAS ZINCADAS E PARA A VARIAÇÃO DO LE_0 EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	64
TABELA	15	-	EQUAÇÕES PARA O LIMITE DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICO PARA O GALVALUME® E AS CHAPAS ZINCADAS E PARA A VARIAÇÃO DESTE PARÂMETRO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA	71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	1	- LINHA DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO À QUENTE (ESQUEMÁTICO)	6
FIGURA	2	- COMPONENTES MECÂNICOS PRESENTES NO POTE DE METAL FUNDIDO: 1- TIRA DE AÇO, 2- ROLO SUBMERSO, 3-ROLO CORRETOR, 4- ROLO ESTABILIZADOR	8
FIGURA	3	- ASPECTO SUPERFICIAL E SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DOS REVESTIMENTOS ZINCADOS DE CRISTAIS NORMAIS E MINIMIZADOS E GALVANNEAL	10
FIGURA	4	- PERDAS POR CORROSÃO DOS REVESTIMENTOS OBTIDOS POR IMERSÃO À QUENTE EM ATMOSFERA INDUSTRIAL DE BETHLEHEM, PA	13
FIGURA	5	- DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FERRO – ZINCO	16
FIGURA	6	- INFLUÊNCIA DO TEMPO DE AQUECIMENTO A 500°C SOBRE O AUMENTO DO PESO DE REVESTIMENTO PARA DIFERENTES REVESTIMENTOS PRODUZIDOS POR IMERSÃO À QUENTE: ALUMINIZADO, 55%Al-Zn E GALVANIZADO	18
FIGURA	7	- DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO ALUMÍNIO – ZINCO	19
FIGURA	8	- REPRESENTAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA CAMADA DE REVESTIMENTO DA LIGA 55%Al- Zn	21
FIGURA	9	- RESULTADOS COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO ENTRE CHAPA ZINCADA POR IMERSÃO À QUENTE E GALVALUME® POR EXPOSIÇÃO DE 13 ANOS EM (a) ATMOSFERA RURAL, (b) ATMOSFERA INDUSTRIAL, (c) ATMOSFERA MARINHA E (d) ATMOSFERA MARINHA SEVERA	23
FIGURA	10	- AÇO BAIXO CARBONO NOS ESTADOS (a) LAMINADO A FRIO, (b) PARCIALMENTE RECRISTALIZADO E (c) TOTALMENTE RECRISTALIZADO	33
FIGURA	11	- CURVA DE RECOZIMENTO ISOTÉRMICO PARA O COBRE ELETROLÍTICO	37
FIGURA	12	- RELAÇÕES TEMPERATURA-TEMPO PARA A RECRISTALIZAÇÃO DE ZIRCÔNIO, CORRESPONDENDO A DOIS DIFERENTES GRAUS DE DEFORMAÇÃO A FRIO	39
FIGURA	13	- CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA E VERDADEIRA PARA AÇO EMPREGADO PARA ESTAMPAGEM PROFUNDA	50
FIGURA	14	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE ESCOAMENTO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA PARA O GALVALUME® E A CHAPA ZINCADA CONSIDERANDO AS TRÊS DIREÇÕES	64
FIGURA	15	- DIFERENÇA DO LIMITE DE ESCOAMENTO PARA AS TRÊS DIREÇÕES – AÇO ZINCADO REVESTIDO. NO GRÁFICO D= DIAGONAL, L=LONGITUDINAL E T= TRANSVERSAL	65
FIGURA	16	- DIFERENÇA DO LIMITE DE ESCOAMENTO PARA AS TRÊS DIREÇÕES – AÇO ZINCADO DECAPADO. NO GRÁFICO D= DIAGONAL, L=LONGITUDINAL E T= TRANSVERSAL	65
FIGURA	17	- DIFERENÇA DO LIMITE DE ESCOAMENTO PARA AS TRÊS DIREÇÕES – GALVALUME® REVESTIDO. NO GRÁFICO D= DIAGONAL, L=LONGITUDINAL E T= TRANSVERSAL	66
FIGURA	18	- DIFERENÇA DO LIMITE DE ESCOAMENTO PARA AS TRÊS DIREÇÕES – GALVALUME® DECAPADO. NO GRÁFICO D= DIAGONAL, L=LONGITUDINAL E T= TRANSVERSAL	66
FIGURA	19	- DIFERENÇA DO LIMITE DE ESCOAMENTO ESPECÍFICO PARA O AÇO ZINCADO E GALVALUME® ENTRE O ESTADO DECAPADO E REVESTIDO NA DIREÇÃO LONGITUDINAL	67
FIGURA	20	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE ESCOAMENTO DO AÇO ZINCADO CONSIDERANDO ESPESSURA DO AÇO BASE E	

		ESPESSURA TOTAL. (MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES)	69
FIGURA	21 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE ESCOAMENTO DO GALVALUME® CONSIDERANDO ESPESSURA DO AÇO BASE E ESPESSURA TOTAL (MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES)	69
FIGURA	22 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE ESCOAMENTO ESPECÍFICO DA CHAPA ZINCADA E DO GALVALUME®, AMBOS DECAPADOS – DIREÇÃO DIAGONAL	70
FIGURA	23 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA PARA O GALVALUME® E A CHAPA ZINCADA CONSIDERANDO AS TRÊS DIREÇÕES	71
FIGURA	24 -	DIFERENÇA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICO PARA O AÇO ZINCADO NO ESTADO REVESTIDO E DECAPADO	72
FIGURA	25 -	DIFERENÇA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICO PARA O GALVALUME® NO ESTADO REVESTIDO E DECAPADO	73
FIGURA	26 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA DO AÇO ZINCADO CONSIDERANDO ESPESSURA DO AÇO BASE E ESPESSURA TOTAL. (MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES)	74
FIGURA	27 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA DO GALVALUME® CONSIDERANDO ESPESSURA DO AÇO BASE E ESPESSURA TOTAL (MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES)	75
FIGURA	28 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICO DA CHAPA ZINCADA E DO GALVALUME®, AMBOS DECAPADOS – DIREÇÃO DIAGONAL	75
FIGURA	29 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE ALONGAMENTO TOTAL PARA AS CHAPAS ZINCADAS E GALVALUME® – MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES	76
FIGURA	30 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE ALONGAMENTO TOTAL PARA AS CHAPAS ZINCADAS REVESTIDAS E DECAPADAS PARA A DIREÇÃO TRANSVERSAL	77
FIGURA	31 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE ALONGAMENTO TOTAL PARA O GALVALUME® REVESTIDO E DECAPADO PARA A DIREÇÃO TRANSVERSAL	78
FIGURA	32 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE ALONGAMENTO TOTAL PARA AS CHAPAS ZINCADAS E GALVALUME® DECAPADOS PARA A DIREÇÃO TRANSVERSAL	78
FIGURA	33 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO PARA AS CHAPAS ZINCADAS E GALVALUME® – MÉDIA DAS TRÊS DIREÇÕES	79
FIGURA	34 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO PARA O GALVALUME® REVESTIDO E DECAPADO – DIREÇÃO TRANSVERSAL	80
FIGURA	35 -	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES DE COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO PARA O GALVALUME® REVESTIDO E DECAPADO – DIREÇÃO DIAGONAL	80
FIGURA	36 -	COEFICIENTE DE ANISOTROPIA PARA AS CHAPAS ZINCADAS E GALVALUME®	81

LISTA DE SÍMBOLOS

A	-	Constante
A_0	-	Área inicial do corpo de prova
A_f	-	Área final do corpo de prova
A_i	-	Área instantânea do corpo de prova
E	-	Módulo de elasticidade ou Módulo de Young
E_d	-	Energia de deformação armazenada no material
e	-	Espessura da chapa / tira
e_b	-	Espessura do aço base
e_r	-	Espessura revestida
e_{rev}	-	Espessura do revestimento
\exp	-	Base dos logaritmos naturais
G	-	Energia livre de Gibbs
K	-	Coeficiente de resistência
L_0, w_0	-	Largura inicial do corpo de prova
L_i	-	Largura instantânea do corpo de prova
L_f	-	Largura do corpo de prova na fratura
LE	-	Limite de escoamento
LE_e	-	Limite de escoamento Específico
LE_L	-	Limite de escoamento na direção longitudinal;
LE_D	-	Limite de escoamento na direção diagonal
LE_T	-	Limite de escoamento na direção transversal
LE_b	-	Limite de escoamento considerando-se espessura do aço base
LE_r	-	Limite de escoamento considerando-se espessura revestida
l_0	-	Comprimento inicial da base de medida
l_f	-	Comprimento da base de medida a deformação conveniente para cálculo de r
LRT		Limite de resistência à tração
LRT_e		Limite de resistência à tração específico
LRT_b		Limite de resistência à tração considerando-se espessura do aço base
LRT_r		Limite de resistência à tração considerando-se espessura revestida
n	-	Coeficiente de encruamento
P	-	Carga aplicada no ensaio de tração
P_{max}	-	Carga máxima do diagrama tensão-deformação de engenharia
P_{10}	-	Carga aplicada correspondente a elongação de 10%
Q	-	Energia de ativação
q	-	Redução de área na fratura
R	-	Constante universal dos gases
r	-	Coeficiente de anisotropia normal
r_m	-	Coeficiente de anisotropia normal médio
r_0	-	Coeficiente de anisotropia normal na direção longitudinal
r_{45}	-	Coeficiente de anisotropia normal a 45° da direção de laminação
r_{90}	-	Coeficiente de anisotropia normal na direção perpendicular a direção de laminação
S	-	Entropia do metal
T	-	Temperatura absoluta

t_0	-	Espessura inicial do corpo de prova
t_f	-	Espessura final do corpo de prova
U_r	-	Módulo de resiliência
v	-	Velocidade de processamento
w_0	-	Largura inicial do corpo de prova
w_f	-	Largura do corpo de prova a deformação conveniente para cálculo de r
ΔLE	-	Acréscimo do limite de escoamento
ΔLE_e	-	Acréscimo do limite de escoamento específico
ΔLRT	-	Acréscimo do limite de resistência à tração
ΔLRT_e	-	Acréscimo do limite de resistência à tração específico
$\Delta \varepsilon$	-	Diferença de alongamento total entre o Galvalume® e a chapa zincada
Δl	-	Variação do comprimento da base de medida do corpo de prova
Δr	-	Coeficiente de anisotropia planar
ε	-	Deformação de engenharia
ε_f	-	Deformação de engenharia na fratura
ε_T	-	Deformação verdadeira
ε_t	-	Deformação verdadeira da espessura
ε_w	-	Deformação verdadeira da largura
ε_y	-	Deformação de engenharia no ponto de escoamento
λ	-	Espaçamento entre partículas de precipitado
σ	-	Tensão de engenharia
σ_T	-	Tensão verdadeira
σ_y	-	Limite de escoamento
σ_u	-	Limite de resistência à tração
τ	-	Tempo de recristalização

RESUMO

Com início de operação em julho de 2003, a Linha de Galvanização Contínua nº5 – LGC#5 da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, localizada em Araucária -PR é do tipo “Dual Purpose” permitindo a produção de aço galvanizado com revestimentos convencionais (zinco puro) e de liga alumínio-zinco (Galvalume®), pelo processo de imersão à quente. Esta linha é a primeira no Brasil a produzir o Galvalume® que é a chapa de aço revestida com uma liga contendo aproximadamente 55%Al, 43,5%Zn e 1,5%Si, especialmente concebida para atender principalmente os mercados de construção civil e linha branca. O Galvalume® apresenta propriedades mecânicas diferentes do aço galvanizado, processados segundo o mesmo ciclo térmico, devido a maior temperatura do metal fundido no pote (465°C para o zinco e 600°C para a liga 55%Al-Zn) com conseqüente diferença nos teores de carbono em solução sólida no aço e também a maior resistência inerente ao revestimento 55%Al-Zn. Através de ensaios mecânicos de corpos de prova revestidos e decapados de diferentes espessuras produzidos na LGC#5, objetiva-se comparar e quantificar as diferenças de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento total, coeficiente de encruamento e coeficiente de anisotropia) das chapas galvanizadas e Galvalume® buscando possíveis correlações entre estas propriedades na direção longitudinal, transversal e diagonal à direção de laminação. As espessuras das chapas zincadas e Galvalume® estudados estão compreendidas entre 0,35 e 0,65mm representando as espessuras produzidas atualmente pela LGC#5 e revestimento de zinco apresentando 260g/m² e revestimento 55%Al-Zn de 150g/m², comparando-se aproximadamente as mesmas espessuras de revestimento para ambos os produtos. O limite de escoamento e limite de resistência à tração específicos apresentaram boa correlação em função da espessura da tira. O Galvalume® apresenta superior limite de escoamento e limite de resistência à tração específicos e alongamento total e coeficiente de encruamento menores quando comparado ao aço zincado para toda a faixa de espessura e direções estudadas. Foram encontradas diferenças significativas entre o limite de escoamento entre as três direções estudadas tanto para o Galvalume® quanto para a chapa zincada. O revestimento 55%Al-Zn desempenha papel detrimental marcante no alongamento total e no coeficiente de encruamento do produto revestido. O coeficiente de anisotropia apresentou grande variação mesmo para a mesma espessura e direção. Com este trabalho a CSN-PR disponibilizará de maior entendimento das propriedades mecânicas do Galvalume® produzido na LGC#5 servindo como base para desenvolvimento de novas aplicações para este produto.

ABSTRACT

With Start up on July of 2003, the CSN's Continuous Galvanizing Line –CGL#5- is a Dual Purpose one, located in Araucária-PR- Brazil, is designed to produce galvanized steel by conventional coating (pure zinc) and Al-Zn alloy coating (Galvalume®) by the hot dip process. It is the first one in Brazil producing the Galvalume®, a steel sheet coated with an alloy containing approximately 55%Al, 43,5%Zn and 1,5%Si, specially conceived for both civil construction and home appliance markets. The Galvalume® shows mechanical properties slightly different from hot dip galvanized steel – HDG- even under the same heat cycle processing. It is due to the higher molten metal temperature (465°C for zinc and 600°C for Al-Zn alloy) resulting in consequent different levels on the carbon in the steel solid solution and also the higher strength of the 55%Al-Zn coating. Through tensile test for coated and stripped samples, for different thicknesses, cut from steel sheets produced at CGL#5, the aim of this paper is to compare and to evaluate the different results of the mechanical properties (yield stress, tensile strength, total elongation, hardening coefficient and anisotropy coefficient) of the HDG and Galvalume® trying to get some relation between them for the straight, transverse and diagonal direction regarding to the rolling direction. The studied thicknesses for the galvanized and Galvalume® varies from 0,35 to 0,65mm which represents the major part of the thicknesses CSN-PR has actually been producing. The studied coating mass for zinc product was 260g/m² and 150g/m² for Galvalume®, comparing approximately the same coating thicknesses for both products. The specific yield stress and tensile strength shows good relation as function of the strip thickness. Galvalume® shows higher specific yield stress and tensile strength and lower total elongation and hardening coefficient regarding to the galvanized products for the studied thickness range and the three directions. It was observed significant differences among the yield stress for the three directions for both Galvalume® and galvanized samples. The 55%Al-Zn coating have significant influence in decreasing the total elongation and the hardening coefficient of the coated product. The anisotropy coefficient figures showed some variation even for the same thickness and direction. With this paper CSN-PR would better understand the mechanical properties of the Galvalume® for future uses developing new applications for this products.

Introdução

Devido as suas muitas características favoráveis, o aço é adequado e amplamente utilizado em grande gama das aplicações de engenharia. O aço possui excelentes propriedades mecânicas, tais como resistência mecânica e ductilidade. Este ainda oferece bons requisitos de formabilidade, soldabilidade e pintabilidade. Outros fatores positivos incluem sua abundância, propriedades ferromagnéticas, reciclabilidade e custo. Devido ao fato do aço ser suscetível à corrosão em presença de umidade e a oxidação a temperaturas elevadas, o sucesso do uso das suas características favoráveis geralmente requer alguma forma de proteção.

Métodos de proteção contra a corrosão do aço incluem: alteração do metal pela adição de elementos de liga, mudança do ambiente por meio de deionização ou uso de inibidores, controle do potencial eletroquímico pela aplicação de correntes anódicas ou catódicas e por aplicação de revestimentos orgânicos e metálicos. A aplicação de revestimentos metálicos pelo processo contínuo de imersão à quente é um dos modos mais utilizados para proteção do aço. Nesse processo, a tira metálica é imersa em um banho de metal fundido de modo contínuo.

Os metais e ligas propensos à aplicação sobre o aço pelo método de imersão à quente são limitados a aqueles com ponto de fusão baixo o suficiente para permitir que a tira metálica passe pelo banho de metal fundido sem a ocorrência de deformações ou arrebentamentos. Estes incluem os revestimentos: zinco puro, liga zinco - ferro, alumínio puro, liga alumínio - silício, liga Zn- 5%Al e liga 55%Al - Zn. Metais como cromo e titânio não podem ser aplicados ao aço por imersão à quente devido aos seus altos pontos de fusão (TOWNSEND, 1993).

As chapas de aço baixo carbono revestidas por imersão à quente são disponíveis em grande gama de propriedades mecânicas. Comparando com aços não revestidos, os aços baixo carbono revestidos por imersão à quente apresentam ductilidade ligeiramente menor devido a efeitos térmicos do processo de revestimento na precipitação de carbono no aço e endurecimento por envelhecimento associado. As chapas para estampagem extra-profunda são produzidas com aço previamente desgaseificado a vácuo e estabilizados ao titânio e/ ou nióbio visando a obtenção de níveis muito baixos de carbono. Os substratos estabilizados são relativamente

imunes aos efeitos térmicos da imersão à quente e resultam em excelentes formabilidades (TOWNSEND, 1993).

O Galvalume® – chapa de aço revestido com a liga 55%Al-Zn - foi inventado e é produzido comercialmente pela Bethlehem Steel Corporation desde 1972 e, em virtude de suas propriedades, 39 dos maiores produtores de aço do mundo já são licenciados, até a data atual, para o uso da tecnologia de produção de Galvalume®.

A produção anual mundial deste produto é de aproximadamente 5 milhões de toneladas, sendo cerca de 70% utilizada na construção civil, 10% em utilidades domésticas, 5% em indústrias automobilísticas (carrocerias de ônibus e escapamentos), 5% na agricultura (silos) e 10% em outras aplicações.

O revestimento tem várias marcas comerciais registradas: Galvalume®, Aluzinc®, Algafort®, Zolutite®, Zincalume®, Zincalit®, entre outros. O produto de aço revestido com liga 55%Al-Zn produzido pela CSN é conhecido comercialmente como Galvalume®.

A CSN possui vasta experiência na produção de aços revestidos com zinco puro e liga Zn-Fe, através da operação de cinco linhas contínuas de imersão à quente. No Brasil, a CSN é atualmente a única empresa licenciada para a produção do Galvalume®, o qual está sendo produzido desde outubro de 2003 na LGC#5. A tabela 1 mostra as características principais, start-up, localização e produtos para as 5 linhas de galvanização contínua da CSN.

TABELA 1 – Características principais das linhas de galvanização por imersão à quente da CSN

LGC	Localização	Start-Up	Capacidade (t/ ano)	Revestimentos	Espessura (Min/ Max) (mm)	Largura (Min/ Max) (mm)
LGC # 1	Volta Redonda-RJ	1973	220.000	Zinco	0,30/ 1,95	610/ 1220
LGC # 2	Volta Redonda-RJ	1989	270.000	Zinco Zinco-Ferro	0,50/ 2,70	610/ 1524
LGC # 3	Volta Redonda-RJ	1984	210.000	Zinco	0,25/ 0,95	610/ 1276
LGC # 4	Porto Real - RJ	2000	350.000	Zinco Zinco-Ferro	0,40/ 1,60	700/ 1800
LGC # 5	Araucária- PR	2003	320.000	Zinco Galvalume®	0,25/ 1,55	700/ 1600

O Galvalume® apresenta propriedades mecânicas diferentes das chapas galvanizadas processadas segundo o mesmo ciclo térmico, devido a maior

temperatura do metal fundido no pote (465°C para o zinco e 600°C para a liga 55%Al-Zn) e também a maior resistência inerente ao revestimento 55%Al-Zn.

O objetivo deste trabalho é comparar e quantificar, através de ensaios mecânicos de corpos de prova revestidos e decapados produzidos na LGC#5, as diferenças de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento total, coeficiente de encruamento e coeficiente de anisotropia) das chapas galvanizadas e Galvalume® buscando possíveis correlações entre estas propriedades destes dois materiais na direção longitudinal, transversal e diagonal.

Como resultado a CSN disponibilizará de maior entendimento e domínio das propriedades mecânicas do Galvalume® produzido na sua linha de galvanização contínua, sendo base para estudos posteriores de aplicação do Galvalume® em usos mais nobres.

No capítulo 1 é realizada uma abordagem sobre os principais aspectos do processo de imersão à quente e os revestimentos resistentes à corrosão obtidos por esse processo (zinco, zinco-ferro, 55%Al-Zn, Zn-5%Al, alumínio, alumínio-silício) com ênfase nas características, processamento e aplicação de cada revestimento. No capítulo 2 realizou-se uma abordagem sucinta de cada seção da Linha de Galvanização Contínua da CSN-PR, onde foram produzidas todas as chapas zincadas e Galvalume® estudadas neste trabalho. No capítulo 3 os aspectos metalúrgicos relativos à produção do aço são discutidos dentre eles o recozimento. No capítulo 4 uma abordagem dos ensaios mecânicos de chapas metálicas é realizada.

1 REVESTIMENTOS RESISTENTES À CORROSÃO OBTIDOS PELO PROCESSO CONTÍNUO DE IMERSÃO À QUENTE

1.1 INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos metálicos pelo processo contínuo de imersão à quente é um dos modos mais utilizados para proteção do aço. Nesse processo, a tira metálica é imersa em um banho de metal fundido de modo contínuo.

Os metais e ligas propensos à aplicação pelo método de imersão à quente são limitados a àqueles com pontos de fusão baixos o suficiente para permitir que a tira metálica passe pelo banho de metal fundido sem a ocorrência de deformações ou arrebentamentos. Estes incluem os revestimentos: zinco puro, liga zinco - ferro, alumínio puro, liga alumínio - silício, liga Zn-5%Al e liga 55%Al - Zn. Metais, como cromo e titânio, não podem ser aplicados ao aço por imersão à quente devido aos seus altos pontos de fusão. O estanho, que até 1937 era aplicado ao aço somente pelo processo de imersão à quente, é atualmente quase sempre eletrodepositado. Isto porque é muito difícil produzir revestimentos finos e uniformes exigidos pelas chapas estanhadas pelo processo de imersão à quente (TOWNSEND, 1993).

A espessura do revestimento é um fator importante na performance dos produtos revestidos. Pode se dizer que revestimentos mais espessos promovem maior proteção contra a corrosão, entretanto revestimentos mais finos tendem a promover melhor formabilidade e soldabilidade. A quantidade de revestimento pode ser expressa em termos de massa por unidade de área. Esta é determinada pela pesagem de uma seção do produto revestido, decapagem do revestimento por solução ácida e pesagem da seção decapada. A tabela 2 sumariza a massa e espessura dos revestimentos obtidos por imersão à quente apresentados neste trabalho e normalizados pela ASTM.

Cada um dos recobrimentos atualmente produzidos tem uma tendência a atender uma ou outra aplicação da indústria. Como exemplos clássicos temos o revestimento Zn-Fe amplamente utilizados na indústria automobilística devido a sua melhor soldabilidade e revestimento 55%Al-Zn com crescente aplicação na construção civil devido a sua superior resistência à corrosão (BIEC International Inc., 1994).

TABELA 2 – Massa e espessura nominais de revestimentos para chapas de aço produzidas pelo processo de imersão à quente

Tipo de Revestimento ^(a)	Designação	Massa Revestimento ^(b) (g/m ²)	Espessura Revestimento ^(c) , μm
Zinco	Z1100	1100	78
	900	900	64
	700	700	50
	600	600	42
	450	450	32
	350	350	25
	275	275	19
	180	180	13
	90	90	6
Zinco-ferro	ZF180	180	11
	120	120	9
	100	100	7
	75	75	5
Alumínio Tipo 1	T1 40	120	20
	25	75	12
Alumínio Tipo 2	T2 100	305	48
	65	195	30
Zn – 5%Al	ZGF700	700	48
	600	600	41
	450	450	31
	350	350	24
	275	275	19
	225	225	15
	180	180	12
	135	135	9
Zn-55%Al	90	90	6
	AZM180	180	24
	165	165	22
	150	150	20

FONTE: ASTM. Livro anual de especificações ASTM, Vol. 01.06, 1993

NOTAS: Valores baseados no valor mínimo do ensaio triplo.

(a) Especificação ASTM.

(b) Relativo aos 2 lados.

(c) Relativo a 1 lado. Calculado com base nas seguintes densidades em g/cm³:

Zinco e Zinco - Ferro - 7,07;

Alumínio Tipo 1 – 3,017;

Alumínio Tipo 2 – 3,21;

Zinco – 5%Al – 6,87;

Zinco – 55%Al – 3,70.

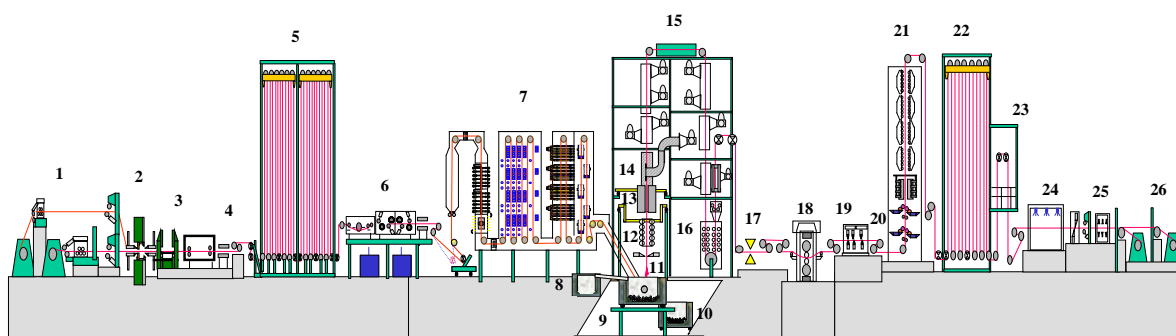
O seguinte capítulo se dedica ao estudo geral do processo de imersão à quente bem como das características básicas dos principais revestimentos obtidos por esse processo.

1.2 PROCESSO DE IMERSÃO À QUENTE

Em linhas contínuas de imersão à quente as bobinas de aço são desenroladas, soldadas e revestidas a velocidades de até 200m/min. Uma moderna linha de galvanização por imersão à quente com capacidade de 320.000 t/ ano, largura da tira revestida entre 700 e 1600mm e espessura entre 0,25 e 1,55mm, está esquematicamente ilustrada na Figura 1.

Após a soldagem, a tira é submetida a um estágio de limpeza alcalina que remove óleo, sujeira e finos de ferro residuais do processo de laminação. Logo após a saída da torre de acumulação da seção de entrada, a superfície da tira é limpa por um estágio de limpeza eletrolítica e escovas mecânicas. Linhas antigas não possuem seção de limpeza e contam com forno de chama direta para limpeza da tira.

FIGURA 1 – Linha de Galvanização por imersão à quente (esquemático)¹



1-Desenroladeiras; 2-Máquina de solda; 3-Entalhador; 4-Pré-limpeza; 5-Acumulador de entrada; 6-Limpeza eletrolítica; 7-Forno de recozimento; 8-Pote de pré-fusão; 9-Pote de liga 55%Al-Zn; 10- Pote de zinco; 11-Navalha de ar; 12-Pré-cooler; 13-Minimizador de cristais; 14-Resfriador nº1; 15-Torre de resfriamento; 16-Quench Tank; 17-Medidor de espessura; 18-Laminador de encruamento; 19-Estiradeira por tensão; 20-Tratamento químico; 21-Torre de cura; 22-Acumulador de saída; 23-Inspeção vertical; 24-Inspeção horizontal; 25-Oleadeira; 26-Enroladeiras.

Logo após a limpeza, a tira passa por uma seção de aquecimento por chama direta seguido de um forno de tubos radiantes contendo atmosfera formada por hidrogênio e nitrogênio que reduz óxidos de ferro presentes na superfície da tira. Esta atmosfera produz superfície perfeitamente limpa sendo facilmente molhada

¹ Apesar da ABNT recomendar a colocação do título sob a figura, adotou-se aqui como padrão colocá-lo na parte superior segundo indicado em “Normas para apresentação de documentos científicos” – Curitiba: Edição da UFPR, 2000.

pelo metal líquido. O recozimento da tira laminada a frio é atingido pelo aquecimento geralmente entre 700 e 820°C dependendo do aço a ser processado. Processamento a temperaturas menores sem recristalização é também usual para a produção de aços “full hard” revestidos gerando produtos de alta resistência. Temperaturas menores são também usadas para revestimento de aços laminados à quente ou para aços previamente recozidos. Após o aquecimento é realizado resfriamento da tira metálica até temperaturas próximas do metal fundido (aproximadamente 460°C para revestimentos de zinco) a fim de se evitar superaquecimento do banho metálico. A combinação dos processos de limpeza, tratamento térmico e adequação da tira à temperatura de imersão de forma contínua tornam este processo econômico.

Em seguida a tira de aço é imersa no pote contendo o revestimento metálico a ser aplicado. A Figura 2 ilustra a região do pote onde o processo de imersão à quente é realizado. Os potes modernos possuem estrutura de aço revestida internamente por camadas de material refratário e são aquecidos por indução elétrica. Os equipamentos em contato com metal líquido tais como rolos, rolamentos e suportes são fabricados com aço inoxidável 316 a fim de resistir ao ataque químico do metal fundido.

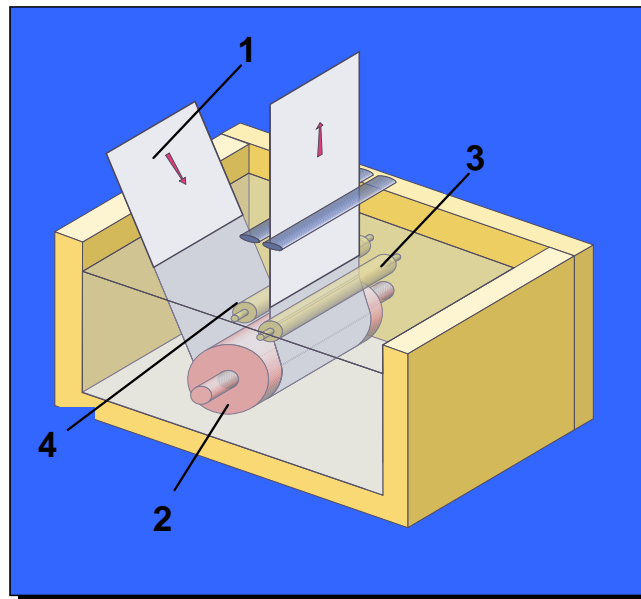
Quando a tira emerge do pote, um filme de metal adere a superfície do aço. A espessura da camada de revestimento é controlada pelas navalhas de ar que sopram na superfície da tira um fluido, que limita a espessura do revestimento. Este fluido pode ser ar, vapor ou nitrogênio.

A uniformidade da espessura do revestimento na largura e comprimento da tira é um importante fator afetando a qualidade e performance dos produtos revestidos. Por esse motivo, é fundamental se evitar flutuações de distância entre a tira e as navalhas de ar, as quais poderiam ser causadas por perfil inadequado da tira ou vibrações dos componentes mecânicos do pote. As dificuldades do perfil da tira são minimizados pelo uso e ajuste do rolo corretor (Figura 2) que está submerso no banho pressionado contra a tira para reduzir o “crossbow” (curvatura). O rolo estabilizador tem a função de manter a tira alinhada com relação às navalhas de ar.

Após o controle do revestimento, sopro de ar é utilizado para reduzir a temperatura da tira. Isso evita defeitos no revestimento devido ao contato deste com

o “top roll”. A tira pode então ser submetida a uma ou mais etapas de pós - tratamentos antes de ser enrolada e pesada na seção de saída.

FIGURA 2- Componentes mecânicos presentes no pote de metal fundido: 1- tira de aço, 2- rolo submerso, 3-rolo corretor, 4- rolo estabilizador.



1.3 PÓS - TRATAMENTOS

Após o controle da espessura de revestimento, várias etapas de pós - tratamentos são disponíveis para a melhoria de características específicas da tira. Uma possibilidade é o tratamento térmico para a produção da liga Zn-Fe ou a minimização de cristais que será discutida posteriormente. Processamentos adicionais podem ser aplicados para melhoria do comportamento mecânico, planicidade, resistência à corrosão e outras propriedades como segue:

- Aplainamento por tensão para melhoria da planicidade;
- Laminação de encruamento para tornar o revestimento mais liso e para reduzir a ocorrência do patamar de escoamento;
- Tratamento térmico de envelhecimento para melhorar as propriedades mecânicas;

- Corte transversal para produção de chapas, corte longitudinal para produção de rolos e apara lateral para remover bordas não uniformes;
- Passivação da superfície para promover proteção temporária do revestimento contra a corrosão durante transporte e estocagem;
- Oleamento para promover lubrificação durante operações de conformação mecânica;
- Oleamento para promover proteção temporária do revestimento contra corrosão durante transporte e estocagem;

1.4 REVESTIMENTOS APLICADOS POR IMERSÃO À QUENTE

1.4.1 Revestimento Zincado:

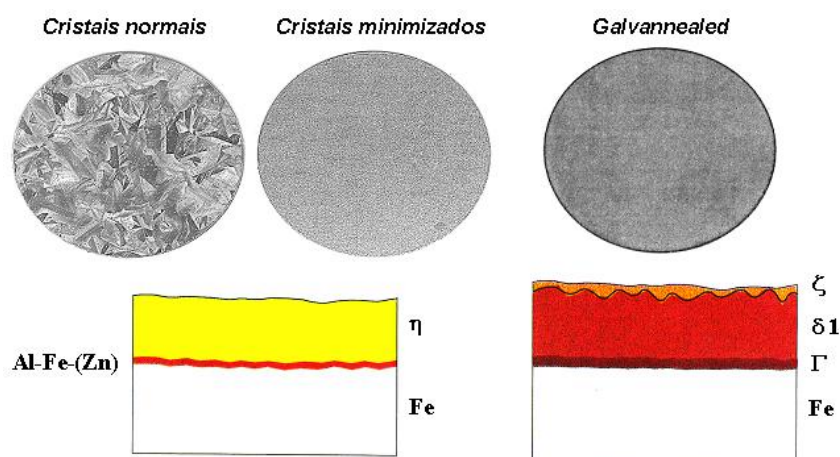
As chapas de aço revestidas com zinco por imersão à quente, também conhecidas como zincadas ou galvanizadas, são sem dúvida, as mais utilizadas mundialmente.

Para aplicações gerais, as chapas zincadas são revestidas com camada de zinco de $19\mu\text{m}$ de espessura em cada lado. Isso corresponde a massa de revestimento de 275g/m^2 (total somando os dois lados). Revestimentos mais espessos são aplicados em aplicações onde máximas resistências à corrosão são requeridas como em calhas de drenagem. Na indústria automobilística, onde formabilidade e soldabilidade são requisitos fundamentais, revestimentos mais leves como 90 g/m^2 são usuais.

1.4.1.1 Microestrutura.

O aspecto superficial (cristais normais e minimizados) e a seção transversal esquemática do revestimento zincado estão mostrados respectivamente nas figuras 3 (a), (b) e (d). Grande parte do revestimento é composto por zinco praticamente puro. Entre o substrato e o revestimento de zinco existe uma camada intermetálica contendo aproximadamente 6% de ferro.

FIGURA 3 - Aspecto superficial e seção transversal esquemática dos revestimentos zincados de cristais normais e minimizados e galvaneal.



1.4.1.2 Banho metálico

Alumínio tipicamente entre 0,1 e 0,2% é adicionado ao banho de zinco a fim de se prevenir a formação de camada intermetálica zinco - ferro espessa, a qual poderia resultar em má aderência do revestimento durante operações de conformação. O alumínio reage preferencialmente com o aço formando uma fina camada intermetálica ferro - alumínio que age como barreira e controla o crescimento da camada intermetálica zinco - ferro.

Quando a tira de aço imerge no banho de zinco fundido, parte do ferro presente na tira é dissolvida no banho promovendo a formação, inicial, do composto FeZn_7 . Quando a concentração de alumínio é alta, o composto FeZn_7 se converte em Fe_2Al_5 segundo a reação abaixo (TOWNSEND, 1993):



A densidade do zinco é 6700Kg/m^3 , a densidade do componente FeZn_7 é 7300Kg/m^3 e a densidade do FeAl_5 é 4200Kg/m^3 . Como resultado, o FeZn_7 (conhecido industrialmente como “bottom dross”) precipita no fundo do pote enquanto o FeAl_5 (conhecido industrialmente como “top dross”) flutua no banho sendo facilmente escumado. Esta é a função secundária do alumínio: transformar, por motivos operacionais, a “bottom dross” em “top dross”.

A curva de solubilidade para o FeAl_5 é expressa pela equação (OTSUKA; ARAI; KASAI, 1998):

$$\log [\% \text{Fe}]^2 \times [\% \text{Al}]^5 = 7,716 - 10932 / T \quad (2)$$

onde:

T = temperatura absoluta (K).

O elemento químico chumbo, originalmente presente nos revestimentos galvanizados como impureza do processo de fusão, causa a formação dos cristais, o familiar aspecto dendrítico da superfície das chapas utilizadas em telhas e tapamentos. Historicamente os cristais eram utilizados para distinguir as chapas de aço zincadas por imersão à quente das chapas menos resistentes à corrosão, revestidas com fina camada de zinco, aplicado por eletrodeposição. A fim de se manter essa distinção, tornou-se prática comum a adição de chumbo (aproximadamente 0,1%). Com o aumento da preocupação ambiental, o uso de chumbo nos revestimentos zincados está em declínio. Antimônio está atualmente sendo freqüentemente utilizado para a formação dos cristais sem os problemas ambientais causados pelo chumbo. O antimônio é duas vezes mais efetivo do que o chumbo na formação dos cristais de zinco.

Os cristais de zinco são suscetíveis a trincas, um fenômeno que ocorre em determinados planos cristalográficos durante conformação das chapas revestidas. Para aplicações onde as chapas são pintadas, como em automóveis e eletrodomésticos, uma superfície mais lisa e livre de cristais é desejada por motivos de aparência. Para esses casos, chumbo, antimônio ou outro elemento formador de cristais pode ser omitido do banho. Quando se deseja produzir chapas zincadas com e sem aparência de cristais em uma única linha sem alteração da composição química do banho, uma alternativa é a realização do processo de minimização de cristais, que consiste da aspersão de vapor, água ou pó de zinco em ambas as faces da tira antes da solidificação do revestimento. A aspersão aumenta o número de sítios de nucleação dos cristais de zinco, o qual minimiza o tamanho dos cristais, tornando a superfície das chapas mais lisa. Melhoria da superfície pode ser obtida por posterior laminação de encruamento da tira revestida.

1.4.1.3 Resistência à corrosão

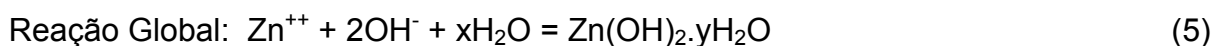
O revestimento de zinco protege o aço de três maneiras diferentes:

- a) Inicialmente, uma camada contínua de zinco na superfície do aço serve como barreira mecânica e separa o aço da atmosfera corrosiva;
- b) Nas imperfeições do revestimento, tais como arranhões e nas bordas cortadas, o zinco se comporta como anodo de sacrifício para promover proteção galvânica;
- c) Após a dissolução anódica do zinco metálico, hidróxido de zinco pode precipitar nas áreas catódicas do aço exposto, formando uma barreira mecânica secundária.

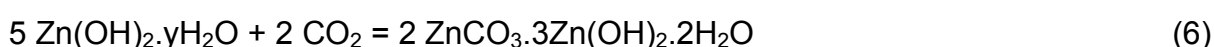
A intrínseca resistência à corrosão do zinco está em sua capacidade de formar um denso e aderente filme de produto de corrosão, o qual inibe a corrosão metálica posterior. Inicialmente, a superfície do zinco inalterada oxida em ritmo relativamente rápido, até que seja coberta por um filme de produto de corrosão protetor. A corrosão então continua, mas em uma taxa bastante reduzida. Entretanto, deve-se salientar que as exatas taxas de corrosão tanto do zinco quanto do aço, dependem da agressividade do meio de exposição a que estejam expostas.

Dependo do meio, a maneira como o zinco se corroerá pode ser vista através da ocorrência de processos distintos, apresentados a seguir (CARVALHO et al, 1997):

Processo 1:



Processo 2:

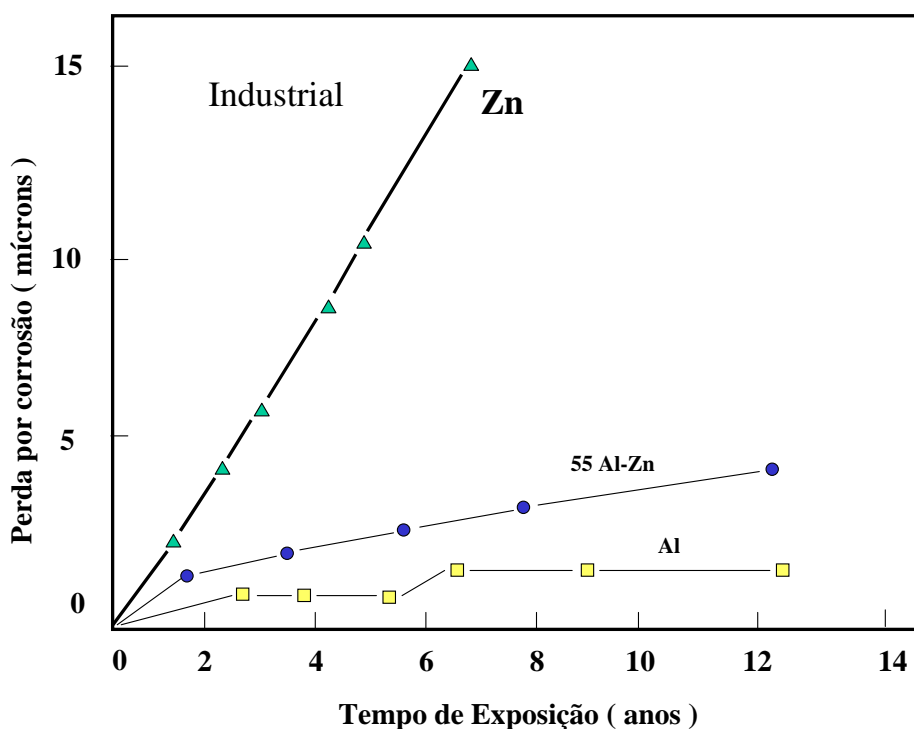


Se o ambiente de exposição da chapa zincada é tal que permita as reações do processo 1, sob ação de chuvas e condensações intermitentes, com bom escoamento e suficiente ventilação, ocorrerá também a reação citada no processo 2, onde o hidróxido inicial se converte em carbonato básico de zinco - $2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn(OH)}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – que representa uma película fina fosca, cristalina, dura, aderente e impermeável que impede a continuidade do processo eletroquímico.

A perda por corrosão dos revestimentos zincados por imersão à quente é geralmente considerada linear. Dessa forma a vida do revestimento zincado é proporcional a sua espessura. No ambiente industrial de Bethlehem, PA (Figura 4) a perda de revestimento pode ser considerada linear com taxa média de aproximadamente $2 \mu\text{m/ano}$ (TOWNSEND; ZOCCOLA, 1979). O comportamento quase linear também é observado em ambientes marinho e rural.

A propriedade de corrosão preferencial do zinco deriva da posição deste elemento em relação ao ferro na série galvânica. O potencial de corrosão do zinco é usualmente 0.4V. menos nobre que o ferro na maioria dos ambientes.

FIGURA 4- Perdas por corrosão dos revestimentos obtidos por imersão à quente em atmosfera industrial de Bethlehem, PA.



FONTE: TOWNSEND, H. E.; ZOCCOLA, J. C. Materials Performance, Vol 10, 1979, p 13-20.

1.4.1.4 Outras propriedades

Sob aquecimento contínuo, as chapas zincadas mantêm seu brilho quando exposto a temperaturas de até 230°C. A temperaturas superiores, inicia-se um processo de difusão da camada externa de metal puro em direção ao metal base aumentando a espessura da camada intermetálica (TIERRA; BERNAL, 1995).

O revestimento zincado pode prejudicar a formabilidade das chapas de aço sob certas condições. Por exemplo, nas operações de estampagem, o maior coeficiente de atrito da superfície zincada contra o punção tende a concentrar a deformação em uma pequena área resultando em menor estiramento total até a falha. O “buildup” de partículas na superfície das matrizes pode causar impressões e má aparência das peças conformadas finais.

A vida dos eletrodos utilizados no processo de soldagem a ponto é reduzida pelo revestimento de zinco como ilustrado na Tabela 3. Esta redução é resultado da ligação do cobre do eletrodo com o zinco, refletindo em maior resistência elétrica local, maior aquecimento e maior erosão da superfície de contato do eletrodo. Menores vidas das pontas dos eletrodos resultam em redução de produtividade e aumentam os custos de produção devido a maior frequência de interrupções das operações de soldagem para retificas dos eletrodos.

TABELA 3. Efeito dos revestimentos aplicados por imersão à quente na vida da ponta dos eletrodos no processo de soldagem por pontos.

Tipo revestimento	Massa revestimento, g/ m²	Vida ponta do eletrodo, número de pontos de solda
Nenhum	-	> 10.000
Zinco	197	2.500
Zinco - ferro	110	6.000
55%Al- Zn	150	700
Alumínio- tipo 1	120	500

FONTE: HOWE, P.; KELLEY, S. C. **A Comparison of the Resistance Spot Weldability of Bare, Hot-Dipped, Galvannealed and Electro galvanized DQSK Sheet Steels**, Paper 880280, Society of Automotive Engineers, 1988.

1.4.2 Revestimento Zinco – Ferro

Também conhecido como galvanneal, o revestimento zinco - ferro produzido por difusão térmica e ligação do revestimento de zinco com o substrato de aço foi desenvolvido na década de 70, a princípio para aplicações sob pintura. Atualmente o

galvanneal é cada vez mais utilizado na indústria automobilística devido a sua melhor pintabilidade e soldagem por costura com relação aos revestimentos de zinco puro de mesma espessura. O teor de ferro do revestimento varia geralmente entre 9 e 12%. Para a indústria automobilística, a espessura de revestimento típica é de $7\mu\text{m}$ com massa de revestimento de 50g/m^2 .

Durante processamento, a tira zincada é aquecida logo após o controle do revestimento a fim de promover a interdifusão do ferro do substrato e do zinco revestimento para formar a liga zinco - ferro. Este aquecimento pode ser realizado por fornos onde o calor é gerado por queima de gases combustíveis ou por indução eletromagnética. Aquecimento a temperaturas entre 500 e 550°C por aproximadamente 10s é suficiente para produzir revestimento de 50g/m^2 contendo por volta de 10% de ferro.

O tempo para o processo de difusão é influenciado pela espessura do revestimento e pela composição química do banho e do substrato. Maior tempo é necessário para a produção de revestimentos mais espessos. O tempo de ligação também aumenta com o alumínio presente no banho e diminui para aços ultra-baixo carbono e aços estabilizados ao titânio e/ou vanádio em comparação com os aços baixo carbono.

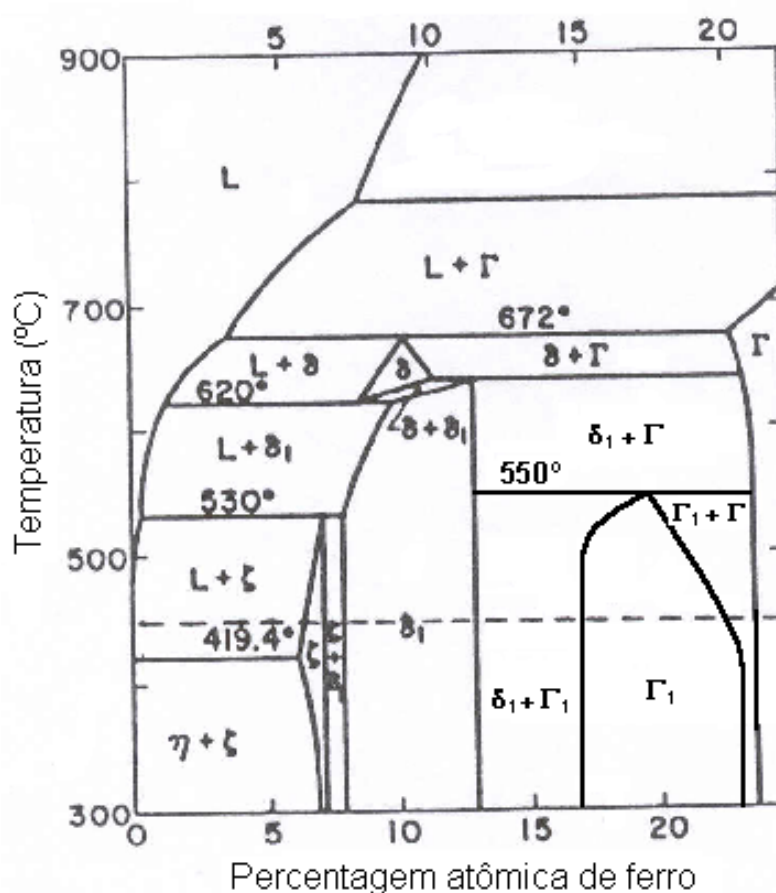
A resistência à corrosão do galvanneal é similar a do zinco puro. Porém, devido à presença de ferro no revestimento, a proteção galvânica não é tão boa quanto ao revestimento zincado (TOWNSEND, 1993).

Comparados aos revestimentos zincados, o revestimento zinco - ferro é geralmente mais fácil de ser pintado sem a utilização de pré - tratamentos especiais.

1.4.2.1 Microestrutura

O aspecto superficial e a seção transversal esquemática do revestimento zinco - ferro está mostrado na figura 3. A fase ζ presente na superfície do revestimento possui estrutura cristalina monoclinica e contém aproximadamente 6% Fe. Acredita-se que a fase ζ possua alto coeficiente de atrito e é então indesejável para algumas operações de conformação e estampagem. O diagrama de equilíbrio Fe-Zn (até 25% de ferro) é mostrado na figura 5, onde as fases presentes na microestrutura do revestimento Fe-Zn podem ser identificadas.

Figura 5 – Diagrama de Equilíbrio Ferro – Zinco.



FONTE: Metals Handbook. ASM International.

A camada intermediária δ_1 possui estrutura cristalina hexagonal compacta e contém ferro entre 8 e 12%. Próxima ao aço encontra-se a camada intitulada como Γ . Num revestimento galvanneal contendo uma mistura dessas fases, é difícil distinguir entre Γ e Γ_1 , ambas apresentando estrutura cúbica com teor de ferro variando entre 16 e 28% (TOWNSEND, 1993).

As fases cúbicas Γ possuem grande número de átomos por célula unitária e limitada ductilidade. Sua presença é mais provável para revestimentos mais espessos e com maiores teores de ferro. Estas também levam a ocorrência de “powdering” durante operações de conformação. O “powdering” é indesejável, pois resulta em perda de revestimento e pode causar “buildup” de revestimento nas superfícies das matrizes resultando em má aparência das peças conformadas finais (TOWNSEND, 1993).

Devido aos problemas citados acima com as fases zeta e gama, o processo de fabricação do galvanneal objetiva a produção de revestimentos compostos principalmente pela fase δ . Entretanto, à medida que a espessura do revestimento aumenta acima de aproximadamente $9\mu\text{m}$, torna-se cada vez mais difícil produzir revestimentos compostos basicamente por esta fase.

1.4.3 Revestimento de Alumínio - Tipo 2

Dois tipos de revestimento aluminizados são produzidos. O tipo 2 é um revestimento mais espesso (tipicamente 30 a $50\mu\text{m}$) aplicado por imersão em banho sem a presença de elementos aditivos. Este produto é utilizado para aplicações na construção civil tais como telhados, bueiros e silo que requerem resistência a corrosão atmosférica e que não sofrem grandes conformações.

A microestrutura do revestimento tipo 2 consiste de uma camada de alumínio e uma camada intermetálica espessa de ferro- alumínio. A conformabilidade e aderência do revestimento são limitadas pela baixa ductilidade da camada intermetálica.

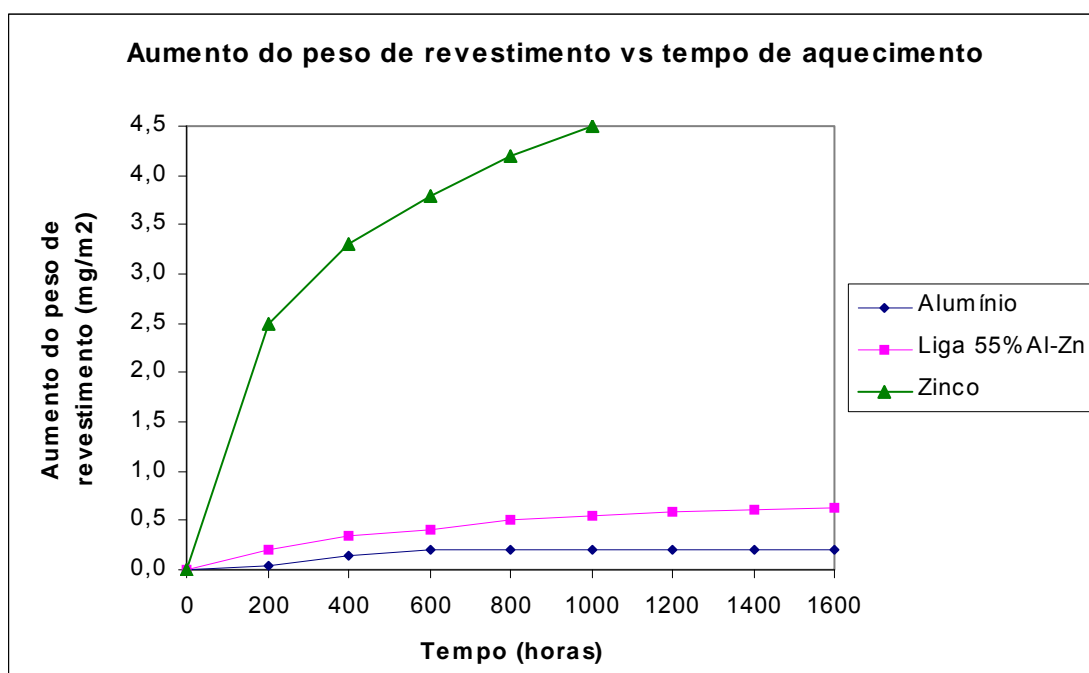
A durabilidade do revestimento aluminizado tipo 2 é excelente na maioria dos ambientes devido a sua boa proteção por barreira e relativa baixa taxa de corrosão, como pode ser visto na figura 4. Entretanto, exceto em ambientes salinos severos, o revestimento aluminizado não apresenta proteção galvânica para o aço. Como resultado, o revestimento Tipo 2, tende a apresentar oxidação nas bordas cortadas e manchas de corrosão nas superfícies adjacentes em atmosferas rural e industrial. Nas atmosferas marinhas, o revestimento aluminizado é suscetível a corrosão por frestas (TOWNSEND, 1993).

1.4.4 Revestimento de Alumínio - Tipo 1

O revestimento aluminizado Tipo 1 é um revestimento mais fino de liga alumínio - silício direcionado a aplicações que requerem formabilidade e resistências a altas temperaturas como em componentes de exaustão de automóveis. A figura 6 mostra um comparativo de resistência à oxidação a 500°C para o revestimento

aluminizado, Galvalume[®] e Zincado. Este revestimento é também aplicado para melhorar a aparência. Para a maioria dos casos, a espessura usual do revestimento tipo 1 (classe 40) é de aproximadamente 20 a 25 μ m. Para aplicações onde a formabilidade é um requisito crítico, uma espessura mais fina de revestimento de 12 μ m (Classe 25) é especificada.

FIGURA 6 – Influência do tempo de aquecimento a 500°C sobre o aumento do peso de revestimento para diferentes revestimentos produzidos por imersão à quente: aluminizado, 55%Al-Zn e Galvanizado.



FONTE: TIERRA, P.; BERNAL, M. Comparative Study on Heat Resistance of Hot Dip Coatings. Industrial Galvanizadora SA, Spain.

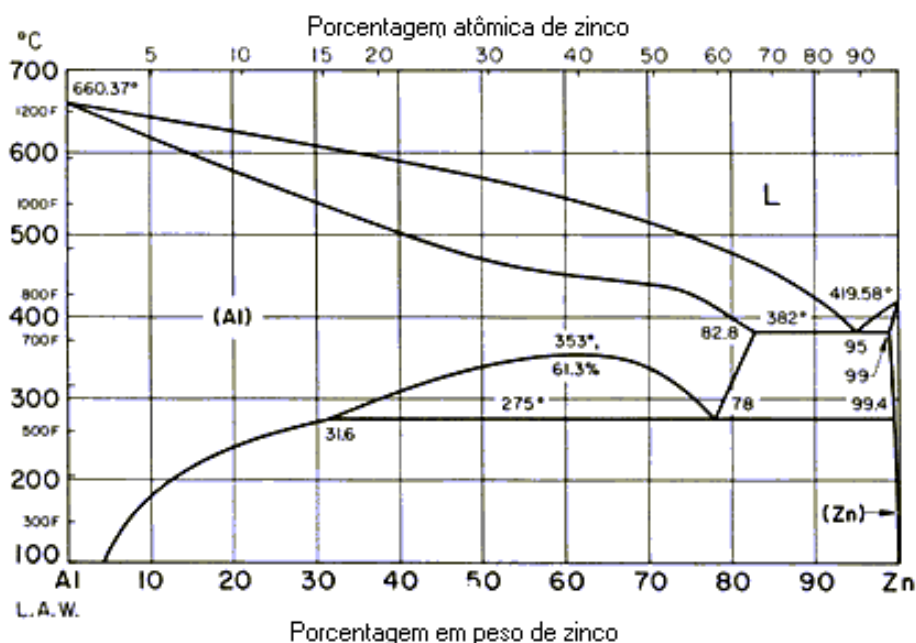
Silício está presente no revestimento Tipo 1 e varia entre 5 e 11% para prevenir a formação de uma camada intermetálica espessa de liga ferro - alumínio, a qual poderia reduzir a aderência e formabilidade do revestimento. Ao invés disso, uma fina camada intermetálica composta por ferro, alumínio e silício é formada (TOWNSEND, 1993).

O alumínio possui efeito mais prejudicial que o zinco no processo de soldagem por pontos das chapas revestidas. O revestimento aluminizado tipo 1 e a liga 55%Al-Zn resultam nas menores vidas das pontas dos eletrodos de soldagem como pode ser visto na tabela 3.

1.4.5 Galfan - Liga Zn - 5%Al:

De acordo com o diagrama de equilíbrio de fase alumínio - zinco (Figura 7), uma liga eutética de baixo ponto de fusão ocorre a 5%Al. Chapas de aço revestidas com liga com esta composição aproximada (entre 4 e 7% Al) são mais resistentes a corrosão que o revestimento zincado de mesma espessura quando submetidos a testes acelerados de laboratório ou em ambientes marinhos severos. Entretanto, o mesmo revestimento não apresenta maior resistência que os revestimentos zincados em ambientes marinho moderado, industrial e rural.

FIGURA 7- Diagrama de Equilíbrio Alumínio - Zinco.



FONTE: Metals Handbook. ASM International.

O revestimento Zn - 5%Al possui pequenas adições de outros elementos. O Galfan contém aproximadamente 0,1% de terras raras (cério e lantânio), os quais são adicionados para aumentar a molhabilidade do banho e reduzir a ocorrência de pontos sem revestimento. Superzinc contém 0,1% Mg, adicionado para combater o efeito adverso das impurezas chumbo e estanho na corrosão intergranular e melhorar aderência da pintura. Os revestimentos eutéticos geralmente não sofrem adição de chumbo e não apresentam cristais.

A microestrutura do revestimento Zn - 5%Al é caracterizada por uma matriz eutética de 5%Al e regiões espalhadas de zinco primário. Camadas intermetálicas não são visíveis devido à menor temperatura do banho e ao elevado teor de alumínio comparado às chapas zincadas convencionais.

1.4.6 Liga 55% Al-Zn (Galvalume[®]):

Galvalume[®] é a chapa de aço revestida com a liga 55%Al-Zn, aplicada por meio de imersão à quente similar ao processo de zincagem convencional. Este revestimento combina a durabilidade do alumínio com a proteção galvânica do zinco, oferecendo excelente resistência a corrosão em atmosferas marinha e industrial, resistência a oxidação a altas temperaturas e refletividade térmica associados com aparência agradável e distinta quando comparado a outros revestimentos semelhantes.

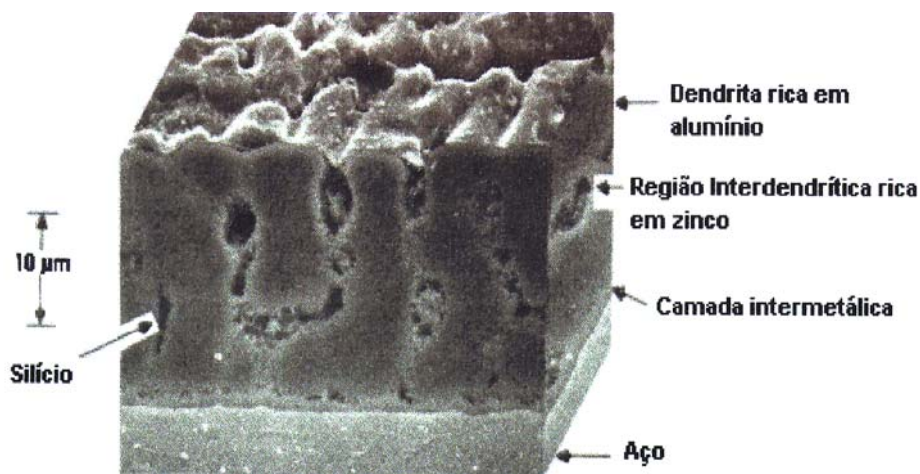
1.4.6.1 Microestrutura

O revestimento tem como composição média 55%Al, 43,5%Zn e 1,5% Si, e consiste de uma estrutura com três fases principais:

- a) Fina camada intermetálica quaternária constituída de Al, Zn, Fe e Si, entre o aço base e o revestimento;
- b) Fase dendrítica rica em alumínio (cerca de 80% do volume), responsável pela resistência a corrosão;
- c) Fase interdendrítica rica em zinco.

Todas as três fases são importantes para promover a resistência à corrosão desejada. A fase interdendrítica rica em zinco promove uma proteção galvânica similar aos revestimentos zincados. Já a fase dendrítica rica em alumínio e a camada intermetálica são responsáveis pela maior durabilidade do revestimento reduzindo a velocidade em que a fase rica em zinco é consumida. A figura 8 mostra uma representação esquemática da seção transversal da camada de revestimento da liga 55%Al-Zn.

FIGURA 8 – Representação da seção transversal da camada de revestimento da liga 55%Al- Zn



FONTE: 55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Research and Technology Manual; BIEC International Inc, BHP Steel, Austrália, 1994.

Aproximadamente 80% do volume da estrutura complexa da chapa revestida com liga 55% Al – Zn é composta por dendritas ricas em alumínio, constituindo o primeiro sólido a se formar durante o resfriamento. Como previsto pelo diagrama de fases, o líquido final a se solidificar nas regiões interdendríticas é enriquecido em zinco. Uma fina (1 a 2 μm) camada intermetálica formada por ferro, alumínio e zinco é evidente na superfície do aço (BIEC INTERNATIONAL Inc, 1994).

Aproximadamente 1,5% de silício é adicionado a liga 55%Al - Zn a fim de minimizar o crescimento da camada intermetálica durante a imersão. Este está presente na forma de agulhas espalhadas, a maior parte na região interdendrítica.

1.4.6.2 Principais características e vantagens

A chapa de aço revestida com liga 55%Al-Zn pode ser produzida em vários níveis de resistência mecânica, desde os graus de alta resistência até os graus de estampagem. A tira, logo após ser produzida, está pronta para pintura em linhas contínuas ou no campo e as chapas podem ser conformadas e unidas pela maioria dos métodos convencionais. Abaixo serão citadas algumas vantagens do Galvalume® com relação à chapa zincada convencional.

1.4.6.2.1 Rendimento em área

O fato da densidade do alumínio ser bem menor que a densidade do zinco, resulta que a camada de liga 55%Al-Zn é muito mais leve do que o revestimento de zinco para mesmas espessuras de revestimento. Por exemplo, o peso do revestimento de zinco Z275 é de 275g/m^2 , enquanto o peso de revestimento 55%Al-Zn AZM150 é de 150g/m^2 , com ambos os revestimentos possuindo a mesma espessura de aproximadamente $20\mu\text{m}$. Isto resulta em maior área coberta por tonelada de aço quando se utiliza o Galvalume[®] em relação ao galvanizado. Para ilustrar a diferença, uma tonelada de Galvalume[®] de 0,45mm de espessura pode cobrir até 4,5% mais área com relação a chapa galvanizada convencional (BIEC INTERNATIONAL Inc, 1994).

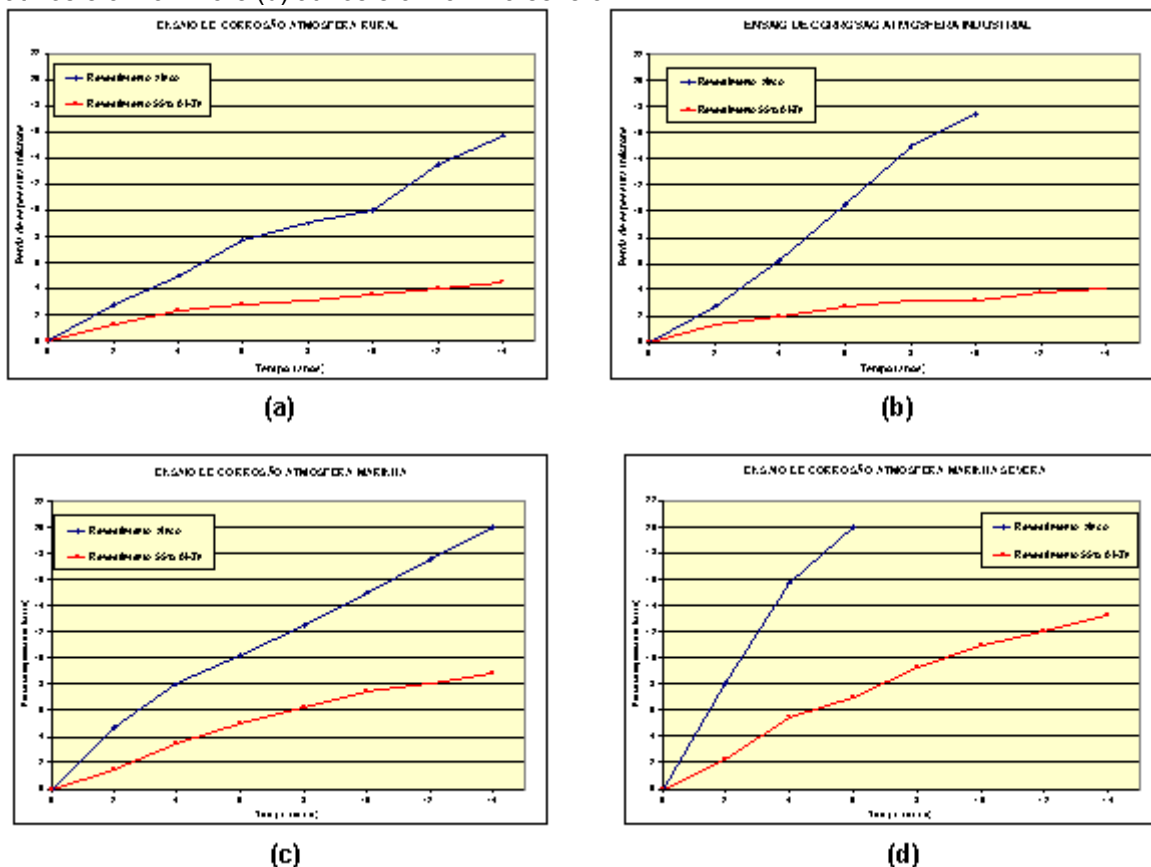
1.4.6.2.2 Resistência a Corrosão

Este tipo de revestimento destaca-se pela elevada resistência à corrosão atmosférica, devido à combinação da durabilidade do alumínio, que confere proteção por barreira mecânica, e a proteção galvânica proporcionada pelo zinco. Exposição de chapas zincadas (revestimento G 90) e Galvalume[®] (revestimento AZM 150) em diferentes atmosferas foi realizada pela Bethlehem Steel e os resultados estão apresentados nas figuras 9 (a), (b), (c) e (d) para exposição em atmosfera rural, industrial, marinha e marinha severo. De acordo com os gráficos podemos verificar que o revestimento 55%Al-Zn é de 2 a 4 vezes mais resistente a corrosão que o aço zincado convencional.

A maioria da corrosão do revestimento ocorre na região interdendrítica rica em zinco. À medida que estas regiões se corroem, os produtos da corrosão do zinco ficam presos nas regiões interdendríticas e agem como barreira que reduz a corrosão posterior. Como resultado, a taxa de corrosão da liga diminui com o tempo.

Embora a distância efetiva da ação galvânica promovido pelo revestimento 55%Al- Zn seja a metade da do zincado, esta ainda é adequada para a proteção das bordas cortadas para espessura de até 1mm na maioria dos ambientes.

FIGURA 9 – Resultados comparativos de resistência à corrosão entre chapa zincada por imersão à quente e Galvalume® por exposição de 13 anos em (a) atmosfera rural, (b) atmosfera industrial, (c) atmosfera marinha e (d) atmosfera marinha severa.



FONTE: 55% Aluminium - Zinc Coated Sheet Steel Research and Technology Manual. BIEC International Inc, 1994.

Como mostrado na figura 4, a taxa de corrosão da liga 55%Al-Zn é maior do que a do revestimento aluminizado. Porém, ao contrario do revestimento aluminizado, a liga 55%Al-Zn é capaz de promover proteção galvânica nas bordas cortadas e arranhões, assim como resistir a corrosão por frestas em ambientes marinhos.

1.4.6.2.3 Refletividade térmica

A maior refletividade térmica do Galvalume®, com relação ao aço galvanizado convencional, resulta em maior eficiência térmica em eletrodomésticos, o que proporciona menor consumo de energia.

A temperatura dentro de uma construção executada utilizando-se Galvalume® tende a ser menor que em uma construção de aço galvanizado. Para

aplicações em construções tais como silos e galpões para estocagem de grãos, os produtos são mantidos a uma menor temperatura, conseqüentemente terão menor degradação, resultando em maior rendimento e durabilidade (BIEC INTERNATIONAL Inc, 1994).

Os custos com condicionameto de ar em escritórios e salas comerciais construídos com Galvalume[®] também são minimizados devido à elevada refletividade térmica desse produto (BIEC INTERNATIONAL Inc, 1994).

1.4.6.2.4 Resistência a altas temperaturas

As chapas revestidas com liga 55%Al-Zn podem ser utilizadas a temperaturas superiores às chapas galvanizadas, porém a temperaturas inferiores às chapas aluminizadas conforme já ilustrado na figura 5. Em termos de aparência a altas temperaturas, o Galvalume[®] mantém o brilho superficial até 320°C enquanto as chapas galvanizadas mantêm o brilho até 230°C (TIERRA; BERNAL, 1995).

2 LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA “ DUAL PURPOSE ” – CSN-PR

A linha de galvanização contínua da CSN-PR foi projetada para a produção tanto de produtos galvanizados convencionais quanto do Galvalume® dentro do conceito “Dual Purpose”. Para isto a linha possui 2 potes que se movimentam perpendicularmente. As características técnicas principais da linha estão apresentadas resumidamente na Tabela 4 (SMS-DEMAG, 2002).

TABELA 4- Características Técnicas Principais da Linha de Galvanização da CSN-PR

Características Técnicas Principais		
Largura da tira (min / máx)		700 / 1600mm
Espessura da tira (mín / máx)		0,25 / 1,55mm
Peso máximo de bobinas		25 t
Diâmetro Interno de Saída		508 ou 610mm
Diâmetro Externo de Saída (min / máx)		600 / 2070mm
Produtos		Galvanizado (cristais normais e minimizados) e Galvalume®
Peso de Revestimento (min/ máx)	Zinco	50/ 200g/m ² /face
	55%Al-Zn	50/100g/m ² /face
Passivação		Cromatização / Resina Acrílica

FONTE: **Technical Specification of CISA-CSN Continuous Galvanizing Line**; SMS DEMAG- EUA, 2002.

A linha possui todos os recursos necessários à produção de galvanizados, com a inserção de outros específicos para a produção do Galvalume®. As seções principais da linha com seus equipamentos serão sucintamente descritos abaixo com relevância a alguns aspectos operacionais importantes da produção do Galvalume®.

2.1 SEÇÃO DE ENTRADA

Nesta seção realiza-se o abastecimento da linha com bobinas laminadas a frio, corte das pontas das bobinas que estão fora da bitola e soldagem por resistência elétrica de sucessivas pontas e caudas das bobinas garantindo a contínua passagem da tira pela linha de galvanização.

2.2 SEÇÃO DE LIMPEZA

É composta por três etapas, sendo a primeira uma seção de Limpeza Química antes da torre de acumulação onde se processa a aspersão de um

desengraxante alcalino (geralmente soda cáustica - NaOH) sobre a tira, para reagir com os óleos (vegetal ou animal) presentes na superfície da tira, sendo então lavada e secada por sopro de ar a temperatura ambiente. Após esta, a tira é submetida a uma Limpeza Eletrolítica, onde a ação de limpeza ocorre por meio de reações eletroquímicas provocadas pela passagem da tira entre eletrodos, promovendo a emulsificação dos resíduos oleosos em ambas as faces da tira. Ocorre também geração de gases, que auxiliam, por ação mecânica adicional, a remoção dos resíduos mais aderentes à superfície da tira. Após a limpeza eletrolítica a tira sofre limpeza por ação mecânica através da passagem por um conjunto de rolos escovadores. Por fim a tira é lavada e secada por sopro de ar aquecido, estando preparada para a seção seguinte.

2.3 FORNO DE RECOZIMENTO

Os principais propósitos do forno de recozimento numa linha de galvanização são:

- Evaporação dos resíduos oleosos presentes na superfície da tira, que não tenham sido removidos em estágios anteriores;
- Redução dos eventuais filmes de oxidação presentes na superfície da tira, por meio de reações com uma atmosfera redutora;
- Tratamento térmico de recozimento da tira laminada a frio, a fim de se obter propriedades mecânicas preestabelecidas;
- Proporcionar a tira uma temperatura adequada para imersão no banho de metal líquido.

O forno de recozimento da CSN-PR é vertical e foi projetado para a produção dos graus comercial, estampagem média, profunda ou extra-profunda, além do grau estrutural. Este está dividido nas seguintes zonas: zona de pré-aquecimento (Pre-Heater Section - PHS), zona de aquecimento por chama direta (Direct Fired Furnace - DFF), zona de aquecimento e encharque por tubos radiantes (Heating and Soaking Radiant Tube Section - RTS), zona de resfriamento controlado (Slow Cooling Section - SCS) e zona de resfriamento rápido (Jet Cooling Section - JCS).

O ciclo térmico é definido em função do tipo de aço processado, visando obter as propriedades mecânicas requeridas pelo produto. As temperaturas de recozimento

para produção de galvanizado e Galvalume[®] são praticamente similares. As taxas de resfriamento, porém são menores para o Galvalume[®] já que a tira deve atingir o banho a uma temperatura superior comparado a produção de aço zincado.

2.4 POTES DE ZINCO E LIGA 55%Al-Zn

Após recozimento, a temperatura da tira é controlada para atingir um valor adequado para imersão no banho de zinco ou de liga 55%Al-Zn. Após este controle de temperatura, a tira é guiada através de um túnel de imersão (“snout”) para o pote de metal fundido, no qual a camada metálica é aplicada. A temperatura da liga 55%Al-Zn no pote é de aproximadamente 600°C, sensivelmente maior que a temperatura do zinco fundido para produção de galvanizado, que é de aproximadamente 465°C. A viscosidade da liga 55%Al-Zn é sensivelmente menor que a do zinco, resultando em menores espessuras da camada primária de revestimento, logo após a imersão.

Para a formação da liga 55%Al, 43,5%Zn e 1,5%Si dois diferentes lingotes são necessários, que são:

- a) Zinco High Grade;
- b) Alumínio contendo 3% Si.

Os lingotes são fundidos em um pote de pré-fusão e a liga fundida é transferida para o pote principal por gravidade, através de uma bica de vazamento que é mantida aquecida por meio de resistências elétricas.

A pressão de vapor de zinco no interior do “snout” durante produção da chapa revestida com liga 55%Al-Zn é consideravelmente maior que em produção de galvanizado, devido à maior temperatura do banho. A pressão de vapor nesse caso é aproximadamente 10 vezes maior quando comparada à que ocorre na produção de galvanizado (BIEC INTERNATIONAL Inc, 1994) e isso pode provocar sérios problemas operacionais. Para amenizar os efeitos indesejáveis da condensação de vapor de zinco, projetos especiais são incorporados na região do “snout” e regiões adjacentes.

Durante a produção de Galvalume[®] a formação de “top dross” (dross flutuante) é muito pequena quando comparada com a gerada no processo de galvanização convencional. O alumínio presente no banho tende a se oxidar

formando uma nata impermeável de óxido que impede a continuação da oxidação do banho metálico.

Diferentemente do processamento do produto zincado convencional, durante o processamento do Galvalume[®], ocorre formação adicional de “bottom dross” (dross de fundo) que por possuir aproximadamente 15% de ferro, possui densidade maior que a do banho 55%Al-Zn.

Outro aspecto importante durante a produção de Galvalume[®] é que diferentemente do zinco líquido, a liga 55%Al-Zn é particularmente agressiva à tira bem como aos componentes imersos no banho. Como exemplo, uma tira de aço carbono com 0,50mm de espessura resistirá ao banho aproximadamente 15 minutos. Após este tempo o ataque do banho na região de contato com a tira tenderá a consumir a mesma completamente. Caso ocorram paradas no processo que ultrapassem esse tempo, movimentação da tira através da linha deve ser realizada, evitando que a tira seja consumida pelo banho. Para paradas longas programadas e troca dos potes de revestimento, utiliza-se aço inoxidável em contato com o metal fundido.

2.5 CONTROLE DE REVESTIMENTO

A espessura da camada de revestimento a ser depositada é calibrada utilizando um sistema de sopro de ar a temperatura ambiente, aplicado através de bocais de alta precisão (navalhas de ar) alimentados por 2 sopradores, logo que a tira emerge do banho de zinco. A espessura do revestimento é função principalmente da velocidade da linha, pressão do ar, distância entre as navalhas e a tira e distância das navalhas à superfície do banho. Como a viscosidade da liga 55%Al-Zn é sensivelmente inferior à do zinco, caso se mantenha todos os parâmetros constantes, a pressão de ar necessária na navalha de ar para retirar o excesso do revestimento 55%Al-Zn é aproximadamente 1/5 daquela necessária para a retirada do excesso de zinco durante produção do galvanizado (CONI et al, 2002).

2.6 MINIMIZAÇÃO DE CRISTAIS

Logo após as navalhas de ar, a tira zincada pode receber um tratamento de minimização de cristais do revestimento, no qual se sopra ar contendo minúsculas partículas de zinco em ambas as faces da tira. Como resultado se altera a aparência dos cristais de zinco que seriam obtidos sem este tratamento. A aplicação do pó de zinco deve ser realizada no limiar da solidificação do revestimento. Para chapas de maior espessura este limiar fica localizado a uma distância (altura) maior em relação ao pote. Por esse motivo, a linha de galvanização conta com um equipamento chamado “pre-cooler”, localizado logo abaixo do minimizador de cristais, e tem a função de reduzir a altura da linha de solidificação do revestimento e também reduzir a diferença de temperatura entre as bordas e o centro da tira.

Os cristais de Galvalume[®] são normalmente bem menores que os cristais do zincado (cristais normais, sem minimização). Para o Galvalume[®], o tamanho dos cristais se encontra entre 1 e 3mm e, assim como no zincado, costuma ser afetado por variações na espessura e na rugosidade da tira laminada a frio.

2.7 RESFRIAMENTO

Durante a produção do Galvalume[®], resfriamento adicional é requerido após a passagem da tira pelo pote em comparação à produção de galvanizado convencional pelas seguintes razões:

- Necessidade de resfriamento adicional para compensar maior temperatura de fusão da liga 55%Al-Zn;
- Deve-se atingir taxa de resfriamento mínima de 11°C/s durante toda a faixa de solidificação do revestimento a partir da temperatura do banho, a fim de se obter um produto de melhor resistência à corrosão, através de uma adequada microestrutura do revestimento. Taxas de resfriamento menores que a especificada resultam em produtos de menor resistência à corrosão.

O passe de subida da torre de resfriamento (“Up Leg Cooling”) possui 5 sopradores, sendo que os 3 primeiros possuem “dampers” que são eletricamente operados de acordo com a taxa de produção visando atender a taxa de resfriamento

mínima de 11°C/s. A taxa de resfriamento está inversamente ligada a distância entre os braços dendríticos observados na microestrutura do revestimento (DAS- “Dendritic Arm Space”) que corresponde na realidade a distância entre as fases ricas em alumínio. A taxa de resfriamento deve ser controlada de modo a se obter DAS entre aproximadamente 10 e 20µm visando a obtenção de boa resistência a corrosão do Galvalume®.

Na seção de resfriamento complementar, a tira é adicionalmente resfriada até aproximadamente 120°C, e depois até aproximadamente 40°C pela passagem em um resfriador à água (“Quench Tank”), no qual se faz a aspersão de água nas duas faces da tira.

2.8 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO

Após o resfriamento, a tira é processada no laminador de encruamento e desempenadeira por tensão, com os seguintes propósitos:

- Melhoria da qualidade do produto no que se refere às propriedades mecânicas do material recozido, tendo como principal efeito a eliminação do patamar de escoamento, principalmente para os casos de aço zincado com baixo e extra-baixo carbono;
- Melhoria da rugosidade e brilho superficial. Para realizar este propósito, deve-se controlar a rugosidade dos cilindros de trabalho e a força de laminação;
- Melhoria das características de forma do material (planicidade);
- Melhoria da aparência superficial através da redução de defeitos (depressões, marcas de rolo, incrustações, etc).

O laminador de encruamento é empregado basicamente durante a produção de produtos zincados de cristais minimizados e Galvalume® que será posteriormente submetido ao processo de pintura.

2.9 SEÇÃO DE TRATAMENTO QUÍMICO

Nesta seção foram instalados dois aplicadores (“coaters”) em passe vertical, para aplicação de uma película de cromato ou de resina acrílica nas duas faces da

tira, com a finalidade de preservar o aspecto superficial das chapas e aumentar a resistência à corrosão do revestimento no caso de exposição a ambientes úmidos. A resina acrílica tem a função adicional de reduzir o coeficiente de fricção entre a tira e as ferramentas de conformação, funcionando dessa forma como lubrificante além de possuir propriedade anti-fingerprint. O filme de cromo visado para as chapas zincadas é de 7 a 11mg/m² enquanto que para o Galvalume[®] é de 20 a 30mg/m². A camada de resina acrílica visa para o Galvalume[®] é de 1,3 a 1,7 g/m² por face.

2.10 SEÇÃO DE SAÍDA

Nesta seção a tira passa por postos de inspeção em passe vertical e horizontal, pode receber filme de óleo protetivo aplicado por uma oleadeira eletrostática, e é enrolada formando as bobinas que são pesadas e embaladas para serem enviadas aos clientes.

3 ASPECTOS METALÚRGICOS

3.1 INTRODUÇÃO

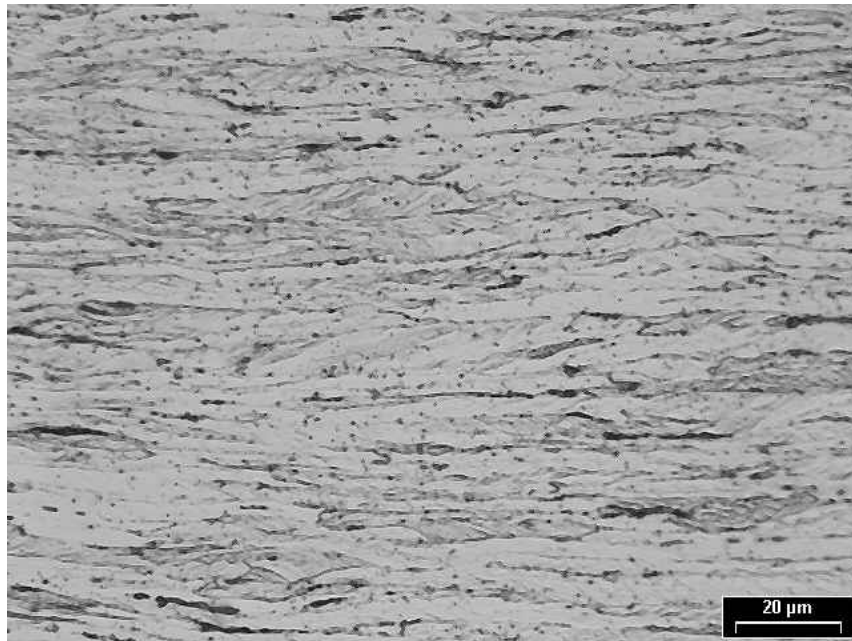
O método usual para produção dos aços revestidos por imersão à quente é a produção da bobina laminada a quente, decapagem para remoção da carepa (óxido), laminação a frio para adequação da espessura e aplicação do revestimento metálico protetor. O processo de laminação a frio pode reduzir a espessura da tira laminada a frio até valores de 90%, o qual aumenta a dureza e para subseqüentes trabalhos de conformação a frio, a ductilidade do aço precisa ser recuperada.

O recozimento do aço laminado a frio é normalmente requerido para produzir microestrutura de ferrita recristalizada a partir dos grãos altamente alongados produzidos no processo de laminação a frio. A figura 10 mostra o efeito do recozimento na microestrutura de uma chapa de aço baixo-carbono laminada a frio. A estrutura laminada a frio é mostrada na figura 10 (a) em contraste com a estrutura parcialmente e totalmente recristalizada nas figuras 10 (b) e (c). Durante o aquecimento do aço e nos primeiros seguimentos do encharque, o primeiro processo metalúrgico que ocorre é a recuperação. Durante este processo, as deformações internas são aliviadas (embora pequena mudança na microestrutura seja evidente) a ductilidade é moderadamente aumentada e a resistência é reduzida em menor escala.

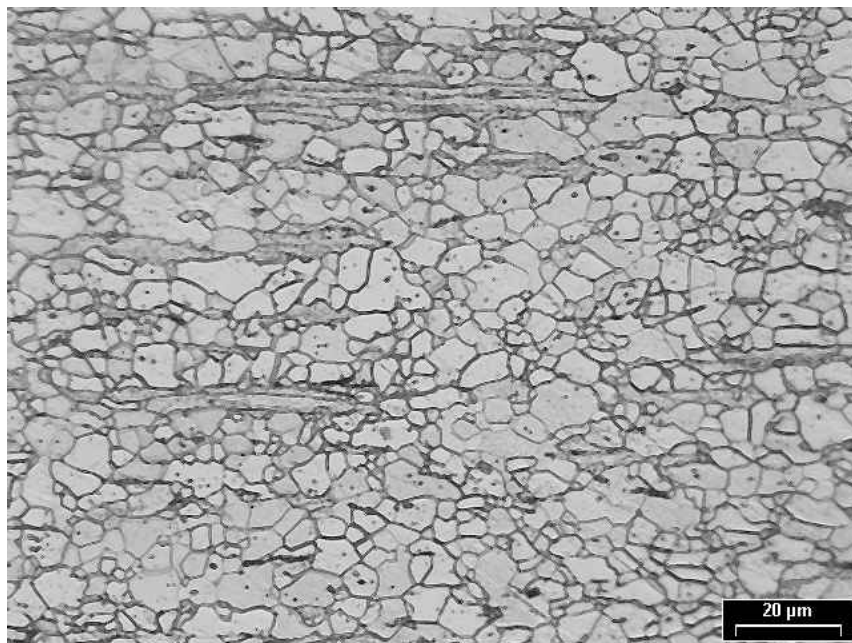
Com a continuidade do recozimento, o processo de recristalização ocorre e novos grãos ferríticos equiaxiais são formados a partir dos grãos alongados. Durante a recristalização, a resistência diminui rapidamente com correspondente aumento da ductilidade. Posteriores tempo e temperatura causam o crescimento dos novos grãos formados às custas dos outros grãos. Esse processo é chamado de crescimento de grão e resulta em modesta redução da resistência e pequeno aumento da ductilidade. A maioria dos aços carbono planos é submetida ao tratamento de recozimento que pode ser realizado comercialmente pelo processo contínuo ou pelo processo de recozimento em caixa. No processo de recozimento em caixa, as bobinas de aço laminado a frio são colocadas em campânulas e sob atmosferas protetoras, são aquecidas por períodos que podem chegar a dias.

Diferente deste, o recozimento contínuo de chapas envolve a rápida passagem da tira através do forno dividido em zona de aquecimento e resfriamento.

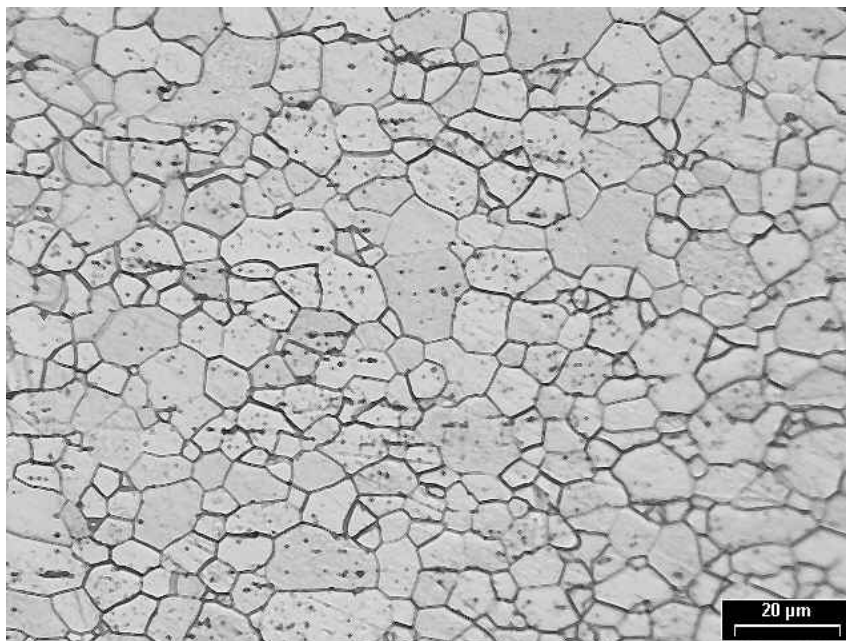
FIGURA 10 – Aço baixo carbono nos estados (a) laminado a frio, (b) parcialmente recristalizado e (c) totalmente recristalizado.



(a)



(b)



(c)

FONTE: CONI, N. H. S. da. Estudo da influência dos ciclos térmicos na estrutura metalográfica e dureza de chapas de aço baixo carbono laminadas a frio. Curitiba, 2002. 20f. Trabalho de Pós-Graduação (Disciplina Técnicas Experimentais em Metalurgia) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.

Adicionalmente às diferenças óbvias de equipamentos, o recozimento contínuo e em caixa apresentam diferenças importantes nos perfis de aquecimento e resfriamento. A grande massa de aço aquece e resfria a velocidades muito baixas durante o recozimento em caixa e o processo requer várias horas de tratamento. Os grãos recristalizados são grosseiros e as baixas taxas de resfriamento asseguram que todo o carbono dissolvido durante o recozimento precipite durante o resfriamento. Como resultado obtém-se excelentes utilidades, embora alguma não-uniformidade se desenvolva devido as diferentes taxas de aquecimento e resfriamento entre as partes externas e internas das bobinas.

Durante recozimento contínuo, as bobinas são desenroladas e processadas em forno de recozimento dividido em 2 estágios, por períodos da ordem de alguns minutos. O primeiro estágio aquece o aço e promove a recristalização enquanto o segundo estágio aquece a temperatura inferior para promover o envelhecimento do aço e remover o carbono da solução sólida. Sem esse estágio, a tira metálica iria resfriar rapidamente e reter o carbono em solução sólida. Esse carbono poderia eventualmente causar envelhecimento por deformação reduzindo a conformabilidade da chapa de aço.

Após o processo de recozimento, onde as chapas de aço apresentam propriedades mecânicas adequadas ao uso final, uma camada metálica protetora pode ser aplicada por imersão à quente ao aço, com o intuito de aumentar a sua resistência a corrosão. Esta camada protetora pode ser aplicada ao aço previamente recozido, ou pode ainda ser aplicado em uma mesma linha de processamento. Nas linhas de revestimento metálico que incorporam forno de recozimento, a etapa de envelhecimento é geralmente excluída porque a aplicação do revestimento a alta temperatura (por exemplo, 465°C para o zinco e 600°C para a liga Al-Zn) após o envelhecimento, resultaria em redissolução dos carbeto e nitreto liberando o carbono e nitrogênio para a solução sólida. Dessa forma, aços revestidos por imersão à quente tendem a possuir maior efeito de envelhecimento por deformação. Neste capítulo, alguns aspectos metalúrgicos do processamento do aço, principalmente recozimento e precipitação, serão discutidos já que exercem significativa influência nas propriedades finais dos aços.

3.2 RECOZIMENTO

Quando um metal é deformado plasticamente em temperaturas bem abaixo do seu ponto de fusão, diz-se que ele foi deformado a frio. A maior parte da energia gasta no trabalho a frio se dissipa na forma de calor, mas uma fração finita é armazenada no metal como energia de deformação associada aos defeitos cristalinos criados pela deformação. A quantidade de energia retida depende do processo de deformação e de outras variáveis, tais como composição do metal, velocidade e temperatura de deformação.

Sabe-se que o encruamento aumenta muito o número de discordâncias de um metal. Um metal recozido completamente tem uma densidade de discordâncias da ordem de 10^6 a 10^8 cm/cm³ e, quando fortemente encruado, pode se ter aproximadamente 10^{12} . Conseqüentemente, a deformação a frio é capaz de aumentar o número de discordâncias de um metal de um fator da ordem de 10.000 a 1.000.000. Como cada discordância é um defeito cristalino com uma deformação do reticulado associada, o número da densidade de discordâncias torna maior a energia de deformação do metal.

A energia de um metal encruado é maior do que a de um metal recozido, diferindo de um valor aproximadamente igual à energia de deformação armazenada. Embora a deformação plástica aumente a entropia do metal, o efeito é pequeno quando comparado com o aumento da energia interna (energia de deformação armazenada). Então, o termo $-TS$ da equação da energia livre de Gibbs pode ser desprezado e, assim, o aumento da energia livre se relaciona diretamente com a energia armazenada:

$$G = E_d - TS \quad (7)$$

onde:

G = energia livre de Gibbs;

E_d = energia de deformação armazenada no material;

T = temperatura absoluta;

S = entropia do metal.

Torna-se

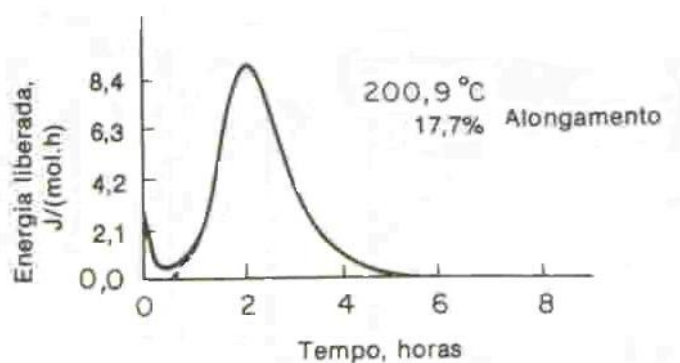
$$G = E_d \quad (8)$$

Como a energia livre dos metais encruados é maior que a dos recozidos, eles podem amolecer espontaneamente. Um metal normalmente não retorna à condição recozida por uma simples reação, dada a complexidade do estado encruado. Ocorrem várias reações, sendo o efeito global o de recuperação de uma condição equivalente à apresentada pelo metal antes de ter sido encruado. Muitas dessas reações envolvem alguma forma de movimentação de átomos ou lacunas e são assim extremamente sensíveis à temperatura. As velocidades dessas reações podem normalmente ser expressas por leis exponenciais simples. Dessa forma, aquecendo-se o metal deformado, a velocidade de retorno ao estado amolecido aumenta consideravelmente.

Informações valiosas sobre a natureza das reações, que ocorrem quando um metal encruado retorna ao seu estado original, podem ser obtidas pelo estudo da liberação de energia armazenada. A figura 11 mostra a energia liberada no processo

de recozimento isotérmico para o cobre de alta pureza (GORDON, 1955). Esta figura apresenta uma região de máxima liberação de energia que aparece simultaneamente com o crescimento de um arranjo totalmente novo de cristais isentos de deformação, que crescem às custas dos cristais anteriormente deformados. O processo pelo qual isso ocorre é chamado de **recristalização** e pode ser entendido como sendo um realinhamento dos átomos dentro dos cristais, que leva a um abaixamento da energia livre.

Figura 11- Curva de recozimento isotérmico para o cobre eletrolítico.



FONTE: REED-HILL, R. E. Physical Metallurgy Principles, p 230- 233.

Apesar da máxima liberação de energia apresentada na figura 11 corresponder à recristalização, a curva mostra que energia é liberada antes da recristalização (linha tracejada na figura 11). A área entre a curva cheia e tracejada, representa uma energia liberada que não está associada à recristalização. O estágio do ciclo de recozimento, anterior à recristalização, é chamado de **recuperação**. Existe ainda um terceiro estágio do processo de recozimento chamado **crescimento de grão**. Este estágio ocorre quando o recozimento continua após o término da recristalização, onde determinados grãos recristalizados continuam a crescer, mas às expensas de outros cristais que, conseqüentemente desaparecem.

Os três estágios do recozimento exercem influência nas propriedades mecânicas finais dos materiais metálicos. Alguns aspectos do processo de recozimento serão discutidos abaixo.

3.2.1 Temperatura de Recristalização

Consiste na temperatura na qual um determinado metal, com certa percentagem de deformação a frio, recristalizará totalmente em um período de tempo, geralmente 1 hora. A correspondência entre tempo e temperatura de recristalização pode ser indicada pela equação abaixo (REED-HILL, R. E, 1982):

$$1/\tau = A \exp^{-Q/RT} \quad (9)$$

onde:

τ = tempo de recristalização;

A = constante;

Q = energia de ativação (J/mol);

R = constante universal dos gases;

T = temperatura absoluta (K).

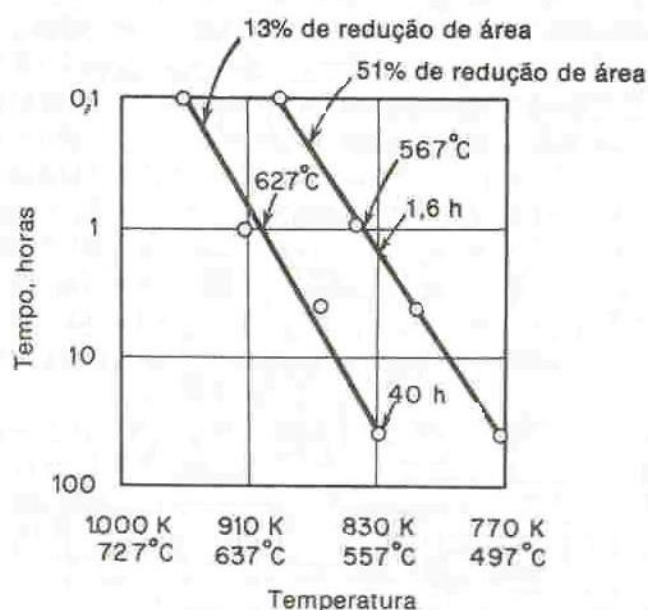
Pela observação da equação acima, verifica-se que a temperatura de recristalização não terá significado, a menos que o tempo de recristalização tenha sido estabelecido. Porém, em razão das altas energias de ativação, a recristalização parece realmente ocorrer a uma determinada temperatura mínima. Suponha, para um determinado metal, $Q = 210.000 \text{ J/mol}$ e que a recristalização termine em 1h a 600K. Pode-se então mostrar, pela equação (9), que se o recozimento for realizado 10°C abaixo da temperatura de recristalização (313°C), a recristalização total se dará em cerca de 2h. Uma amostra desse metal estará só parcialmente recristalizada ao fim de um recozimento de 1 hora a 10°C abaixo da temperatura de recristalização (323°C). Por outro lado, um recozimento por 1 hora é mais do que suficiente para recristalizar totalmente o material a qualquer temperatura acima de 323°C . De fato, com 10°C acima dessa temperatura (333°C), encurta-se o tempo de recristalização para meia hora e, com 20°C acima, para aproximadamente 15 minutos. Para efeito prático, essa sensibilidade do processo de recristalização a pequenas variações de temperatura faz parecer que o metal tem uma temperatura determinada, abaixo da qual não haverá recristalização e, por essa razão, há uma

tendência de se considerar a temperatura de recristalização como uma propriedade do metal e de se desprezar o tempo como variável da recristalização.

3.2.2 Efeito da deformação na recristalização

Duas curvas de velocidade de recristalização são mostradas na figura 12. Os dados estão colocados no gráfico de modo usual ($\log 1/\tau$ vs. $1/T$). As duas curvas representam a deformação do zircônio por forjamento rotativo. As duas curvas mostram claramente que a recristalização acelera quando se aumenta o encruamento. Quando recozidos a mesma temperatura, o material que foi mais deformado recristaliza muito mais rapidamente do que o menos deformado. Como exemplo, a 553°C, os tempos para recristalização completa são de 1,6 e 40 horas para as reduções maior e menor, respectivamente. Analogamente, a temperatura na qual o metal recristalizará completamente em 1 hora é menor para o que foi mais deformado, 567°C, quando comparado aos 627°C do material menos deformado.

FIGURA 12 – Relações temperatura-tempo para a recristalização de zircônio, correspondendo a dois diferentes graus de deformação a frio.



FONTE: REED-HILL, R. E. Physical Metallurgy Principles, p 246-247.

3.2.3 Pureza do metal

Metais extremamente puros apresentam grandes velocidades de recristalização. Isto evidencia a estreita dependência entre a temperatura de recristalização e a presença de soluto. Pequenas porcentagens, como 0,01% de um elemento estranho em solução sólida, podem elevar a temperatura de recristalização de algumas centenas de graus. Assim, um metal espectroscopicamente puro recristaliza em temperaturas muito menores do que um metal comercialmente puro.

O efeito de átomos de soluto sobre a velocidade de recristalização é mais sensível para baixas concentrações. Como uma pequena percentagem de átomos do soluto tem um efeito tão pronunciado nas velocidades de recristalização, acredita-se que os átomos do soluto interagem com os contornos de grão. A interação proposta é semelhante à existente entre discordância e átomos do soluto. Quando um átomo estranho migra para um contorno de grão, tanto a energia elástica como a do contorno diminuem. Na recristalização, os contornos de grão se movimentam quando ocorre nucleação e crescimento. A presença de átomos estranhos nas atmosferas associadas à esses contornos retarda muito a sua movimentação e assim diminui a velocidade de recristalização.

3.3 ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

A resistência e dureza de algumas ligas metálicas podem ser alteradas pela formação de pequenas partículas uniformemente distribuídas de uma segunda fase na matriz original. Este processo precisa ser seguido por tratamentos térmicos apropriados. Este processo é chamado de endurecimento por precipitação porque as pequenas partículas de segunda fase são chamadas de precipitados. O endurecimento por envelhecimento é também designado por esse fenômeno porque a resistência se desenvolve com o tempo a medida que a liga envelhece.

O endurecimento por precipitação ou envelhecimento pode ser produzido por um tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera numa liga na qual uma segunda fase fica em solução sólida em temperaturas elevadas, mas precipita frente a um resfriamento rápido e envelhece a baixas temperaturas. O duro-alumínio, as ligas cobre-berílio e os aços baixo carbono são exemplos característicos desse

fenômeno. Para o endurecimento por precipitação ocorrer é necessário que a segunda fase seja solúvel em temperaturas elevadas, mas que diminua a sua solubilidade com o decréscimo da temperatura.

As partículas de segunda fase atuam de duas maneiras distintas para retardar o movimento das discordâncias. As partículas podem tanto ser cortadas pelas discordâncias como resistirem ao corte e as discordâncias serem forçadas a contorna-las. Um parâmetro crítico que define o mecanismo de movimento das discordâncias em presença de partículas de segunda fase é o espaçamento entre as partículas λ . Quando as partículas são pequenas ou macias, estas são cortadas e deformadas pelas discordâncias. Caso os precipitados sejam duros, as discordâncias tendem a se mover ao redor das partículas.

3.4 EFEITO DA TEMPERATURA DE IMERSÃO E TAXA DE RESFRIAMENTO NO TEOR DE CARBONO EM SOLUÇÃO SÓLIDA DO AÇO BASE

Devido a maior temperatura de imersão da tira no banho durante a produção de Galvalume[®] (560–580°C) comparada com a temperatura de imersão durante a produção dos aços zincados (465–490°C), e devido a maior taxa de resfriamento da tira após imersão durante a produção de Galvalume[®], são esperados maiores níveis de carbono em solução sólida no Galvalume[®] comparado aos produtos zincados.

A solubilidade do carbono no ferro cúbico de corpo centrado em equilíbrio com Fe₃C é mostrada em função da temperatura na tabela 5.

TABELA 5 – Solubilidade do carbono no ferro CCC em equilíbrio com Fe₃C em função da temperatura.

Temperatura (°C)	ppm C
700	168
600	68
450	13,5
350	2,8

FONTE: LAKE, J.S.H.; BROWNE, K. M. **The effect of soluble carbon on mechanical properties of low carbon steel with reference to Zincalume**, John Lysaght (Australia) Limited Research and Technology Centre, May, 1978.

Os valores mostrados na tabela 5 são referentes ao equilíbrio e não são necessariamente atingidos nas situações práticas de produção. A 600°C, as solubilidades de equilíbrio são atingidas dentro de poucos segundos, porém a

450°C, vários minutos podem ser requeridos para se atingir o equilíbrio, dependendo da história prévia de fabricação do aço (LAKE; BROWNE, 1978). Então para o Galvalume[®], que é rapidamente resfriado a partir da temperatura de 600°C, é esperado teor de carbono em solução sólida da ordem de 60ppm enquanto para o aço zincado, que é mantido a aproximadamente 465°C antes da imersão e resfriado a taxa menor que a aplicada para o Galvalume[®], o teor de carbono será maior do que 13ppm porque não haverá tempo suficiente para a precipitação do carbono até o valor de equilíbrio. Medições do teor de carbono em solução sólida para Galvalume[®] e o aço zincado, ambos não submetidos a nivelamento por tensão, mostram 45-60ppm e 20-30ppm respectivamente (LAKE; BROWNE, 1978). Estes valores podem ser modificados durante nivelamento por tensão e envelhecimento antes da realização dos testes de rotina na indústria. Um importante fator é a quantidade de carbono que pode ser precipitada antes do nivelamento por tensão e envelhecimento, pois esta diferença nos níveis de carbono em solução sólida significa diferenças significantes entre as propriedades mecânicas do Galvalume[®] e do aço zincado.

4 ENSAIOS MECÂNICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Os materiais de engenharia estão em serviço submetidos a forças e cargas de várias naturezas. Para essas situações é necessário conhecer as características do material que compõe a peça em estudo e assegurar que qualquer deformação resultante não será excessiva e que não provoque fratura da peça em questão. O comportamento mecânico de determinado material reflete a relação entre sua resposta ou deformação sob determinada carga ou força. Importantes propriedades mecânicas são resistência, dureza, ductilidade e rigidez.

As propriedades mecânicas dos materiais são descobertas através de experimentos laboratoriais cuidadosamente realizados a fim de replicar as condições de serviço. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e sua duração, assim como as condições ambientais. É possível que a carga aplicada seja de tração, compressão ou cisalhamento e sua magnitude ser constante com o tempo ou continuamente flutuante. O tempo de aplicação pode ser apenas uma fração de segundo, ou pode se estender por período de vários anos. A temperatura de serviço é um importante fator a ser considerado.

Este capítulo se dedica ao estudo das principais propriedades mecânicas necessárias as chapas de aço revestidas durante utilização como componentes estruturais e as propriedades necessárias para fabricação por processos de conformação mecânica.

4.2 CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA

O teste de tração de engenharia é amplamente utilizado para a obtenção de informações básicas sobre a resistência dos materiais, e como teste de controle de especificações.

No ensaio de tração, um corpo de prova é deformado, geralmente até a fratura, com aumento gradual da carga de tração uniaxial ao longo do seu eixo. Normalmente a seção transversal do corpo de prova é circular, porém seção retangular é comum para estudo de chapas metálicas. A máquina de tração é

programada para realizar o alongamento do corpo de prova a taxa constante e para realizar medidas contínuas da carga aplicada (através de células de carga) e a elongação resultante (através de extensômetros).

O resultado de um teste tração é uma curva força ou carga versus elongação. Essa característica carga-elongação é dependente das dimensões do corpo de prova. Por exemplo, será necessário o dobro da carga para produzir a mesma elongação se a seção transversal do corpo de prova for multiplicada por dois. Para minimizar esses fatores geométricos, a carga e a elongação² são normalizadas para os respectivos parâmetros **Tensão de Engenharia** e **Deformação de Engenharia**. A tensão de engenharia é definida pela equação:

$$\sigma = P / A_0 \quad (10)$$

onde:

σ = tensão de engenharia;

P = carga aplicada no ensaio de tração;

A_0 = área inicial do corpo de prova.

As unidades para a tensão de engenharia são megapascal, Mpa (Sistema Internacional), onde 1 MPa = 10^6 N/mm², e libra força por polegada quadrada, psi.

A deformação de engenharia é definida pela equação:

$$\varepsilon = (L_i - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0 \quad (11)$$

onde:

ε = deformação de engenharia;

L_i = largura instantânea do corpo de prova;

L_0 = largura inicial do corpo de prova.

² Nomenclatura utilizada em DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**, 2ª ed. McGraw-Hill, Inc, 1981.

A deformação de engenharia é adimensional, porém metros por metro ou polegadas por polegada são usualmente empregadas. O valor da deformação é obviamente independente do sistema de unidades. A deformação pode também ser expressa em porcentagem onde o seu valor é multiplicado por 100.

4.3 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A taxa com a qual uma estrutura se deforma depende da magnitude da tensão aplicada. Para a maioria dos metais submetidos a esforços de tração relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, segundo a equação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (12)$$

onde:

σ = tensão aplicada;

E = módulo de Young;

ε = deformação de engenharia.

Este comportamento é conhecido como Lei de Hooke e a constante de proporcionalidade E (GPa ou psi) é o módulo de elasticidade ou módulo de Young. Para os metais mais típicos a magnitude deste módulo varia entre 45GPa ($6,5 \times 10^6$ psi), para o magnésio e 407GPa (59×10^6 psi), para o tungstênio.

A deformação na qual tensão e deformação são proporcionais é chamada de deformação elástica. O gráfico da equação (12) é representado por uma reta cuja inclinação corresponde ao módulo de elasticidade E . Quanto maior E , mais rígido é o material ou menor é a deformação elástica resultante da aplicação de determinada tensão. O módulo de Young é um importante parâmetro para o cálculo de deflexões elásticas.

As deformações elásticas são não permanentes, o que significa que quando a carga aplicada é retirada, o corpo de prova retorna a seu formato original.

4.4 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Para a maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica persiste somente até deformações aproximadas de 0,005. À medida que o material é deformado além deste ponto, a tensão não é mais proporcional a deformação, e a deformação torna-se permanente, não-recuperável ou deformação plástica ocorre. A transição do comportamento elástico para o plástico é gradual para a maioria dos metais, porém para alguns metais observa-se o fenômeno limite de escoamento descontínuo.

Na perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde a quebra das ligações com átomos vizinhos originais e então formação de novas ligações com novos vizinhos e maior número de átomos e moléculas se movem com relação a outros. Sob remoção da carga estes não retornam as suas posições originais. O mecanismo desta deformação é diferente para materiais cristalinos e amorfos. Para os sólidos cristalinos, a deformação é realizada por meio de processos de escorregamento, o qual envolve movimento de discordâncias. A deformação plástica nos sólidos não cristalinos ocorre por mecanismo de fluxo viscoso.

4.5 PROPRIEDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO

4.5.1 Limite de Escoamento

A maioria das estruturas é projetada de modo a assegurar que somente deformação plástica resulte quando determinada carga é aplicada. Por esse motivo é necessário conhecer o nível de tensão na qual a deformação plástica se inicia, ou quando o fenômeno do escoamento ocorre. Para metais que apresentam transição gradual do comportamento elástico-plástico, o ponto de escoamento pode ser determinado pelo início da perda da linearidade da curva tensão-deformação. Este ponto é conhecido como limite de proporcionalidade. Em tais casos, a posição deste ponto pode não ser determinada com precisão. Por esse motivo, uma convenção foi estabelecida onde uma reta é construída paralela a porção elástica da curva tensão-deformação a partir de uma deformação inicial, usualmente 0,002. A tensão correspondente à interseção da reta com a curva tensão-deformação é chamada de *limite de escoamento* σ_y .

Para alguns aços e outros materiais a transição do comportamento elástico-plástico é muito bem definida e ocorre abruptamente. Este fenômeno é chamado de limite de escoamento definido. No limite de escoamento superior, a deformação plástica é iniciada com aumento da tensão. A deformação continua flutuando ao redor de um valor constante de tensão, chamado de limite de escoamento inferior; posteriormente a tensão aumenta com aumento da deformação. Para metais que apresentam tal comportamento, a tensão de escoamento é tomada como sendo a média entre o limite de escoamento superior e inferior.

4.5.2 Limite de Resistência à tração

Após o escoamento, a tensão necessária para a continuação da deformação plástica aumenta até atingir um valor máximo, para então decrescer até a fratura. O limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia e é definida pela equação abaixo:

$$\sigma_u = P_{\text{máx}} / A_0 \quad (13)$$

onde:

σ_u = limite de resistência a tração;

$P_{\text{máx}}$ = carga máxima no diagrama tensão-deformação de engenharia;

A_0 = área inicial do corpo de prova.

Toda a deformação até o limite de resistência à tração é uniforme através de toda a região de deformação do corpo de prova. Entretanto, sob tensão máxima, uma pequena constrição ou pescoço se forma em algum ponto do corpo de prova e toda deformação posterior é confinada nesse pescoço.

4.5.3 Dutilidade

A dutilidade é outra importante propriedade mecânica. Esta mede o grau de deformação plástica que determinado material pode suportar até a sua fratura. Um material que apresenta muito pequena ou nenhuma deformação plástica é chamado de frágil.

As medidas convencionais de ductilidade obtidas do teste de tração são a deformação de engenharia na fratura ε_f (normalmente chamada de alongação ou alongamento) e a redução de área na fratura q . Ambas as propriedades são obtidas depois da fratura juntando-se as partes e tomando-se as medidas L_f e A_f e utilizando-se as equações abaixo:

$$\varepsilon_f = (L_f - L_0) / L_0 \quad (14)$$

onde:

ε_f = deformação de engenharia na fratura;

L_f = largura do corpo de prova na fratura;

L_0 = largura inicial do corpo de prova.

$$q = (A_0 - A_f) / A_0 \quad (15)$$

onde:

q = redução de área na fratura;

A_0 = área inicial do corpo de prova;

A_f = área final do corpo de prova.

O conhecimento da ductilidade dos materiais é importante principalmente por dois motivos. Primeiro, porque indica ao projetista o grau no qual determinada estrutura suporta deformação plástica antes da fratura. Segundo porque especifica o grau de deformação permissível durante operações de fabricação tais como laminação e extrusão.

4.5.4 Resiliência

Resiliência é a capacidade de determinado material absorver energia quando é deformado elasticamente e libera-la quando descarregado tendo então esta energia recuperada. A propriedade associada é o módulo de resiliência, U_r , a qual representa a energia de deformação por unidade de volume necessária para

deformar determinado material do estado descarregado até o seu limite de escoamento.

O módulo de resiliência pode ser computacionalmente obtido pela área sob a curva tensão-deformação de engenharia até o limite de escoamento ou através da equação abaixo:

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (16)$$

Assumindo região elástica linear, a equação (16) torna-se:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (17)$$

Incorporando a equação (12) na equação (17) obtemos:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y (\sigma_y / E) = \sigma_y^2 / 2 E \quad (18)$$

onde:

U_r = módulo de resiliência;

σ_y = limite de escoamento;

ε_y = deformação de engenharia no ponto de escoamento;

E = módulo de Young.

Essa equação indica que o material ideal para resistir a cargas em aplicações onde o material não deve sofrer deformação permanente, tais como molas mecânicas, é um que possua uma tensão de escoamento alta e um módulo de elasticidade baixo.

4.5.5 Tenacidade

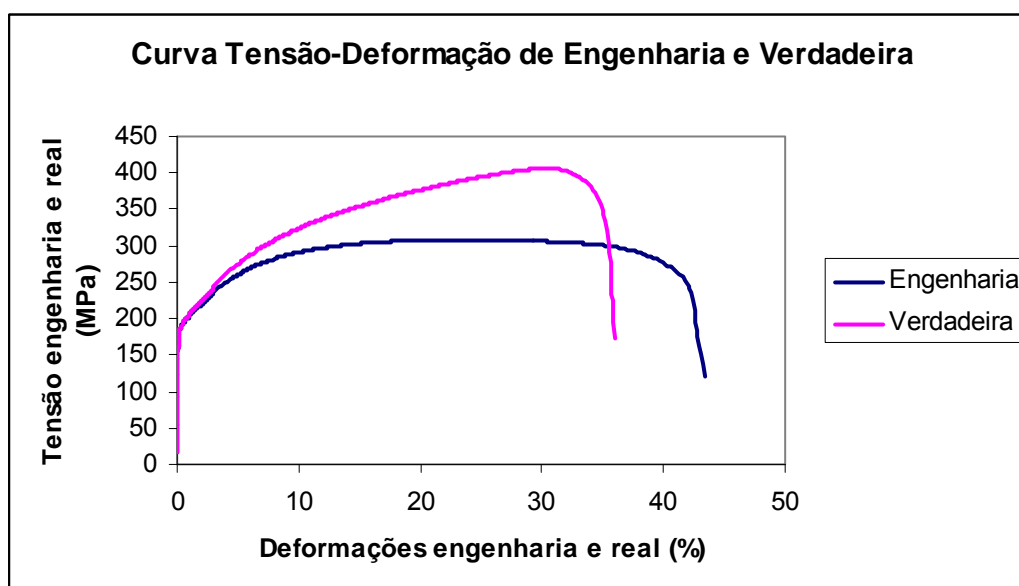
A tenacidade mede o grau de deformação plástica que determinado material pode suportar até a sua fratura (CALLISTER, 1999). A capacidade de suportar tensões ocasionais acima da tensão de escoamento sem fraturar é particularmente desejável em peças como engates de vagões de carga, engrenagens e correntes e ganchos de guindastes. A tenacidade é um conceito comumente usado que é difícil

de ser definido. Uma maneira de se encarar a tenacidade é considerá-la como sendo a área total sob a curva tensão-deformação. Essa área é uma indicação da quantidade de trabalho por unidade de volume que pode ser realizado no material sem causar a sua fratura.

4.6 CURVA TENSÃO – DEFORMAÇÃO VERDADEIRA

A curva tensão-deformação de engenharia não demonstra uma indicação verdadeira das características de deformação de um metal porque esta é inteiramente baseada nas dimensões originais do corpo de prova, e na realidade, essas dimensões mudam continuamente durante o ensaio. Também um metal dúctil que é tracionado se torna instável e forma um pescoço no decorrer do teste. Como a área da seção reta transversal do corpo de prova está diminuindo rapidamente nesse estágio do ensaio, a carga necessária para continuar a deformação também diminui. Do mesmo modo, a tensão média baseada na área original decresce, e isso produz a queda na curva tensão-deformação após o ponto de carga máxima. Na realidade, o metal continua a encruar até a fratura, de maneira que a tensão necessária para produzir deformações adicionais deveria crescer mesmo depois da formação do pescoço. A figura 13 mostra uma curva tensão-deformação verdadeira e uma curva tensão deformação de engenharia para aço aplicado para estampagem.

FIGURA 13 – Curva tensão-deformação de engenharia e verdadeira para aço empregado para estampagem profunda.



Algumas vezes, é mais significativo utilizar a curva tensão-deformação verdadeira. Nesta, a tensão verdadeira é definida pela carga P dividida pela seção transversal instantânea do corpo de prova, A_i , conforme a equação abaixo:

$$\sigma_T = P / A_i \quad (19)$$

onde:

σ_T = tensão verdadeira;

P = carga aplicada no ensaio de tração;

A_i = área instantânea do corpo de prova.

A deformação verdadeira é definida pela equação abaixo:

$$\varepsilon_T = \ln (L_i / L_0) \quad (20)$$

onde:

ε_T = deformação verdadeira;

L_i = largura instantânea do corpo de prova;

L_0 = largura inicial do corpo de prova.

Considerando-se conservação de volume durante a deformação, isto é:

$$A_i L_i = A_0 L_0 \quad (21)$$

A tensão e deformação de engenharia e verdadeira podem ser relacionadas pelas equações:

$$\sigma_T = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (22)$$

$$\varepsilon_T = \ln (1 + \varepsilon) \quad (23)$$

As equações (22) e (23) são válidas somente até o aparecimento do pescoço no corpo de prova. Após esse ponto, a tensão e deformação verdadeira devem ser computadas a partir da carga atual, seção transversal e medições do comprimento da base de medida.

4.7 PROPRIEDADES RELACIONADAS À CONFORMAÇÃO MECÂNICA

As propriedades mecânicas convencionais não fornecem boas aproximações para serem utilizadas como comparativos entre diferentes materiais a serem submetidos a processos de conformação mecânica.

Um exemplo de problemas encontrados quando se utilizam as propriedades mecânicas para prever comportamento de materiais sob conformação é fornecido por medidas do alongamento total. O alongamento total inclui sua parte uniforme e também aquela observada após o aparecimento do pescoço no corpo de prova. Seu valor é também dependente da base de medida utilizada no ensaio de tração. O aparecimento de estricções em peças submetidas a operações de estampagem é freqüentemente motivo de rejeição, entretanto, qualquer alongamento após estricção não pode ser utilizado. Dessa forma, o alongamento total do material não apresenta boa correlação com a sua performance em operações de estampagem.

Outra propriedade mecânica convencional utilizada para avaliar a conformabilidade é o limite de escoamento. Como regra geral, a conformabilidade diminui à medida que o limite de escoamento aumenta. Enquanto esta afirmação possa ser verdadeira para lotes de aços produzidos de maneira similar, essa é uma generalização pobre. O limite de escoamento apenas indica a tensão na qual a deformação plástica se inicia e não indica a quantidade de deformação plástica permissível até a estricção. A comparação entre um aço baixo carbono e um aço inoxidável é um excelente exemplo. O limite de escoamento do aço inoxidável pode ser três vezes superior a do aço baixo carbono, porém sua conformabilidade é geralmente maior.

Existem duas propriedades que afetam fortemente a habilidade dos materiais metálicos de serem conformados. Essas duas propriedades podem ser avaliadas através do teste de tração convencional utilizando corpos de prova também convencionais. A primeira propriedade é o coeficiente de encruamento n , que determina a habilidade de determinado material ser estirado. A segunda propriedade é o coeficiente de anisotropia r , que está ligado à habilidade do material sofrer estampagem profunda.

4.7.1 Coeficiente de Encruamento

A curva de escoamento de muitos metais e ligas, especialmente o aço, na região de deformação plástica uniforme, pode ser aproximada por uma relação potencial simples:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (24)$$

onde:

σ = tensão de engenharia;

K = coeficiente de resistência;

ε = deformação de engenharia;

n = coeficiente de encruamento.

Pela equação acima, n é definido como coeficiente da relação tensão-deformação. Também conhecido como coeficiente de endurecimento por deformação, determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto maior n , maior o endurecimento por deformação do material em questão.

Fisicamente, o coeficiente de encruamento pode ser diretamente relacionado com a razão LRT/LE. Desenvolvimentos matemáticos mostram que n é igual a deformação verdadeira quando do aparecimento da estricção, o qual representa o alongamento uniforme do material. Quanto maior n , maior a resistência a estricção.

O coeficiente de encruamento pode variar do valor $n = 0$ para os sólidos perfeitamente plásticos, até $n = 1$ para os sólidos elásticos. Para a maioria dos metais n apresenta um valor entre 0,10 e 0,50. A tabela 6 apresenta valores de n e K para alguns materiais à temperatura ambiente.

TABELA 6 – Valores de n e K para materiais à temperatura ambiente

Material	Condição	n	K (Mpa)
Aço 0,05%C	Recozido	0,26	526
Aço SAE 4340	Recozido	0,15	636
Aço 0,6%C	Temperado e revenido a 538°C	0,10	1556
Aço 0,6%C	Temperado e revenido a 704°C	0,19	1216
Cobre	Recozido	0,54	321
Latão 70/30	Recozido	0,49	895

FONTE: DIETER, GEORGE E. Mechanical Metallurgy, 1981, p 291.

Vários métodos são disponíveis para avaliar o valor de n . A base para a maioria deles é a equação (24) reescrita como:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (25)$$

onde:

σ = tensão de engenharia;

K = coeficiente de resistência;

ε = deformação de engenharia;

n = coeficiente de encruamento.

a qual é representada graficamente por uma reta de equação $y = a + nx$ quando plotada em papel log-log. Se a equação é representada por uma reta, n é uma constante e representa a inclinação da reta. O valor de K é a tensão interceptada pela reta a um valor de deformação igual a 1,0.

Caso a linha seja curva, valores instantâneos de n precisam ser calculados para cada valor de deformação de interesse. A linha deve possuir dois segmentos retos. Isso ocorre para alguns aços inoxidáveis. Para a maioria dos aços baixo carbono e muitos dos metais não-ferrosos, comumente usados em processos de conformação, um valor constante será aproximado da curva tensão-deformação.

Um segundo método muito comum é o Nelson-Winlock, o qual assume que a equação $\log \sigma - \log \varepsilon$ é representada por uma reta. Dessa forma, quaisquer dois pontos são suficientes para definir a curva e permitir o cálculo do valor de n . Dois valores convenientes de deformação são escolhidos e a carga em cada ponto é lida no display da máquina ou tomada em gráficos. Um ponto, o mais fácil de ser medido, é a carga máxima (P_{\max}). O outro valor pode ser obtido em qualquer valor de deformação que exclua a porção inicial da curva o limite de escoamento descontínuo e outras variações. Por conveniência a carga é lida a elongação de 10% (P_{10}). É importante que a taxa de deformação seja mantida constante entre 0 e P_{10} .

A razão P_{\max}/P_{10} é calculada e o valor de n é obtido de tabela ou gráfico. A correspondência entre o valor de n e o alongamento uniforme é dada pela equação:

$$n = \ln (1 + \varepsilon) \quad (26)$$

onde:

n = coeficiente de encruamento;

ε = deformação de engenharia.

Assim como para outras propriedades, os valores obtidos são influenciados pelas técnicas utilizadas, velocidades, temperatura e direção da qual o corpo de prova é retirado da chapa metálica. O valor de n tende a diminuir com o envelhecimento e a deformação a frio.

4.7.2 Coeficiente de Anisotropia Normal – Coeficiente de Lankford

Um índice mecânico muito útil relacionado à anisotropia plástica é r , o qual é definido como a razão entre a deformação verdadeira da largura e a deformação verdadeira da espessura em teste de tração de corpo de prova padrão (50mm como base de medida). Um método de se obter r , é plotar a deformação da largura (ε_w) versus a deformação da espessura (ε_t) para vários pontos até a estricção. Para a maioria dos materiais utilizados em processos de conformação, a curva será uma linha reta. O valor de r será constante e é simplesmente a inclinação da curva.

Desde que a representação gráfica de (ε_w) versus (ε_t) seja uma reta, um método de dois pontos pode ser utilizado. O primeiro ponto é o de deformação zero. O outro é alguma deformação conveniente, como 15 ou 20%. Após a conformação, o valor de r é calculado pela fórmula:

$$r = [\ln (w_f / w_0)] / [\ln (t_f / t_0)] \quad (27)$$

onde:

r = coeficiente de anisotropia normal;

w_f = largura do corpo de prova a deformação conveniente para cálculo de r ;

w_0 = largura inicial do corpo de prova;

t_f = espessura final do corpo de prova a um % conveniente para cálculo de r ;

t_0 = espessura inicial do corpo de prova.

Infelizmente, grandes erros são possíveis pela medição da espessura em chapas finas. Usando o fato do volume do metal permanecer constante durante a deformação plástica, a equação (27) pode ser reescrita em termos de deformação da largura e comprimento do corpo de prova:

$$r = [\ln (w_f / w_0)] / [\ln (l_f w_f / l_0 w_0)] \quad (28)$$

onde:

l_f = comprimento da base de medida a deformação conveniente para cálculo de r ;

l_0 = comprimento inicial da base de medida.

O parâmetro de anisotropia r pode ser obtido para diferentes direções na chapa metálica. Normalmente, corpos de prova são removidos a 0, 45 e 90° em relação a direção de laminação. Em testes de materiais perfeitamente isotrópicos todos os valores de r seriam igual a unidade. Para a maioria dos aços e outros materiais, entretanto, existem variações dos valores de r para as várias direções. Esta variação de r no plano da chapa é chamado de coeficiente de anisotropia planar (Δr) e é responsável pelo orelhamento em operações de estampagem profunda de copos. A equação para obtenção do coeficiente de anisotropia planar é:

$$\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2r_{45}) / 2 \quad (29)$$

onde:

Δr = coeficiente de anisotropia planar;

r_0 = coeficiente de anisotropia normal na direção de laminação;

r_{90} = coeficiente de anisotropia normal na direção perpendicular a direção de laminação;

r_{45} = coeficiente de anisotropia normal a 45° da direção de laminação.

Δr é a diferença entre o valor de r_{45} e o valor médio de r_0 e r_{90} . Orelhamentos ocorrem em direções de alto valor de r . Para os aços, altos valores de r , e dessa forma as orelhas, são usualmente entre 0 e 90° com relação a direção de laminação.

Se $\Delta r = 0$ não ocorre formação das orelhas. Se o valor de r_{45} é o maior, orelhas são formadas a 45° .

Pode-se definir também o coeficiente de anisotropia normal médio pela equação:

$$r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4 \quad (30)$$

onde:

r_m = coeficiente de anisotropia normal médio.

Caso r_m seja maior que a unidade, o material é caracterizado por ter resistência ao afinamento e possui elevada resistência na direção da espessura. Da mesma maneira, valor de r_m menor que a unidade implica em facilidade de afinamento.

Infelizmente, um material com elevado coeficiente de anisotropia normal, possui também elevado coeficiente de anisotropia planar. Um exemplo típico é o aço acalmado ao alumínio que apresenta $r_0 = 1,43$, $r_{45} = 1,20$, $r_{90} = 2,50$, $r_m = 1,58$ e $\Delta r = +0,76$.

O grau de anisotropia é fortemente ligado à estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia se desenvolve mais fortemente em metais hexagonais e compactos (berílio, titânio e zircônio) do que em metais cúbicos de corpo de centrado ou cúbicos de face centrada (aço, cobre e alumínio). O tipo e quantidades de elementos de liga também influenciam a anisotropia. Um excelente exemplo é o efeito do alumínio no aumento da anisotropia dos aços acalmados ao alumínio comparados aos aços efervescentes. Para determinado metal ou liga a anisotropia é consequência de sua história de processamento. Especialmente importante para os aços são temperatura de acabamento, temperatura de bobinamento, taxa de redução a frio e ciclo de recozimento.

O revestimento de zinco diminui o coeficiente de anisotropia normal, devido a restringir as deformações na largura. Estas restrições se devem principalmente a elevada dureza do revestimento, que ao se difundir fragiliza o material (LOBÃO, M. C. et al, 2002)

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO E PARÂMETROS DE LAMINAÇÃO

O aço empregado para a produção do grau comercial é produzido com a classificação CSN de grau 2710. A composição química, temperaturas de laminação e bobinamento a quente e grau de redução a frio estão descritos nas tabelas 7 e 8.

TABELA 7 - Composição química do grau 2710.

Elemento	Mínimo	Máximo	Visado
C	0,03	0,05	0,04
Mn	0,25	0,35	0,30
P	0	0,02	-
S	0	0,025	-
Si	0	0,02	-
Cu	0	0,06	-
Ni	0	0,04	-
Cr	0	0,06	-
Mo	0	0,02	-
Al	0,02	0,05	0,035
N	0	0,006	-
Nb	0	0,005	-

TABELA 8 - Temperaturas de laminação e bobinamento a quente e taxa de redução do grau 2710.

Temperaturas		Taxa Redução (%)
Laminação (°C)	Bobinamento (°C)	
870	610	77,92

5.2 PARÂMETROS DE PROCESSO - LINHA DE GALVANIZAÇÃO

Os parâmetros de processo utilizados para a produção das chapas utilizadas para confecção dos corpos de prova galvanizados e Galvalume[®] são descritos na tabela 9.

As temperaturas de processamento do aço são independentes do revestimento a ser aplicado com exceção da temperatura da tira na seção de resfriamento lento que é 20°C inferior para o Galvalume[®] por motivos operacionais e no “snout”, onde a temperatura de processamento é sensivelmente maior para o Galvalume[®] devido a maior temperatura do banho.

As velocidades de processamento foram controladas durante processamento de modo a não ultrapassar as velocidades máximas limites do forno de recozimento que segue a seguinte equação:

$$v = 98,5 / e \quad (31)$$

onde:

v = velocidade de processamento (m/min);

e = espessura da tira (mm).

TABELA 9 - Parâmetros de Processo – Linha de Galvanização.

Parâmetro		Zincado	Galvalume®.
Temperatura em cada seção do Forno Recozimento (°C)	Seção chama direta	590	590
	Seção aquecimento	720	720
	Seção Encharque	720	720
	Seção Resfriamento Lento	650	630
	Seção Resfriamento Rápido - Snout	465 - 490	560 - 580
Temperatura Banho (°C)		465	600
Composição Química banho		Al- 0,16 a 0,20% Sb – 0,04 a 0,06% Zinco - balanço	Al – 53,0 a 57,0% Zn- 41,0 a 44,0% Si – 1,4 a 1,6% Fe – 0,4 a 0,6%

5.3 NORMAS TÉCNICAS PRODUTOS ZINCADOS E GALVALUME®

Os produtos zincados e Galvalume® devem ser produzidos de modo a atender normas técnicas específicas. As propriedades mecânicas segundo as normas ASTM A653M (produtos zincados) e ASTM A792M (Galvalume®) para o grau comercial são descritos nas tabelas 10.

TABELA 10: Propriedades mecânicas dos produtos zincados e Galvalume® - Graus Comerciais - segundo normas técnicas.

Revestimento	Grau	Limite Escoamento MPa	Limite Resistência MPa	Base Medida mm	Alongamento Mínimo %
Zincado	CS A	170 - 345	Não Especificado	50	20
	CS B	205 - 345		50	20
	CS C	170 - 380		50	15
Galvalume®	Type A	205 - 410		50	20
	Type B	245 - 410		50	20
	Type C	205 - 450		50	15

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

As chapas de aço galvanizadas e Galvalume® foram coletadas durante produção normal da linha de galvanização contínua da CSN-PR. A tabela 11 mostra a quantidade de corpos de prova preparados (para cada chapa selecionada) em função dos ensaios realizados e direção do corte dos mesmos com relação à direção de laminação e as normas técnicas utilizadas para obtenção de cada uma das propriedades mecânicas.

TABELA 11 – Quantidade de corpos de prova preparados em função dos ensaios realizados e direção do corte dos mesmos com relação à direção de laminação

Ensaio	Propriedade	Norma Técnica Ensaio	Propriedade	Quantidade	Localização
Peso Revestimento	Peso Revestimento	ASTM A 90M	Peso Revestimento	3	Sentido Longitudinal (Borda lado operador, centro e Borda lado motor)
Tração Uniaxial – corpos de prova revestidos	LE (0,2%)	ASTM E 8	LE (0,2%)	3 - Longitudinal 3 -Transversal 3- Diagonal (45°)	
	LRT	ASTM E 8	LRT		
	ΔL	ASTM E 8	ΔL		
	n	ASTM E 646	n		
	r	ASTM E 517	r		
Tração Uniaxial – corpos de prova decapados	LE (0,2%)	ASTM E 8	LE (0,2%)	3 - Longitudinal 3 -Transversal 3- Diagonal (45°)	
	LRT	ASTM E 8	LRT		
	ΔL	ASTM E 8	ΔL		
	n	ASTM E 646	n		
	r	ASTM E 517	r		

Foram selecionadas (4) amostras de espessuras diferentes de chapas zincadas e (5) amostras de espessuras diferentes de Galvalume®. As chapas analisadas foram produzidas com revestimentos de zinco e 55%Al-Zn com aproximadamente a mesma espessura e atendendo a normas técnicas específicas. As espessuras das chapas analisadas e os valores dos pesos de revestimento especificados e medidos e suas respectivas espessuras estão mostrados na tabela 12.

Para cada chapa correspondendo a cada espessura, foram cortados seis corpos de prova em cada uma das três direções. Desses corpos de prova, três foram submetidos ao ensaio de tração no estado revestido e três no estado decapado.

A comparação entre as propriedades mecânicas dos corpos de prova revestidos e decapados permite avaliar a influência do revestimento no material revestido. Analogamente, a comparação entre as propriedades mecânicas dos corpos de prova no estado decapado (Galvalume® e aço zincado) permite avaliar a influência do processamento nas propriedades mecânicas do aço base.

Todos os corpos de prova ensaiados foram produzidos a partir do mesmo aço base (Grau 2710).

O revestimento dos corpos de prova para ensaio de tração e para ensaio do peso de revestimento foi removido através de solução de ácido clorídrico PA dissolvido em água (50% v/v).

TABELA 12 – Espessuras dos corpos de prova estudados, seus pesos de revestimento especificados e medidos e espessuras calculadas dos revestimentos.

Chapa	Amostra	Espessura da amostra revestida ^(a) (mm)	Massa Revestimento ^(b) (g/m ²)	Espessura Revestimento ^(c) , μm
Zincada	1	0,433	267,50	37,84
	2	0,503	264,87	37,46
	3	0,506	268,00	37,91
	4	0,653	270,93	38,32
	Média	0,524	266,79	37,74
	Especificação^(d)	-	260,00	36,77
Galvalume®	1	0,393	169,27	45,75
	2	0,456	174,57	47,18
	3	0,516	169,77	45,88
	4	0,520	176,67	47,75
	5	0,648	164,97	44,59
	Média	0,506	171,05	46,23
	Especificação^(e)		150,00	40,54

NOTAS: (a) Média das espessuras dos corpos de prova retirados na direção longitudinal, diagonal e transversal;

(b) Relativo as duas faces. Valores médios do ensaio triplo segundo NBR 7008;

(c) Relativo as duas faces. Calculado com base nas seguintes densidades em g/cm³:

Zinco - 7,07;

55%Al / Zn- 3,70;

(d) Revestimento B segundo NBR 7008;

(e) Revestimento AZM150 segundo ASTM A792M.

Os ensaios de tração utilizados para determinação do limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento total, coeficiente de encruamento e coeficiente de anisotropia foram realizados em máquina de tração SHIMADZU

AUTOGRAPH TYPE AG-G que possui automatização para cálculo das propriedades mecânicas citadas. O coeficiente de anisotropia foi calculado com utilização de extensômetros medindo largura da base de medida e largura do corpo de prova.

Durante realização dos ensaios foi observado que a presença de rebarba nos corpos de prova para o ensaio de tração possui papel marcante negativo na obtenção das propriedades mecânicas principalmente alongamento total. Este papel é agravado para os corpos de prova decapados e à medida que se diminui a sua espessura. Por esse motivo, todos os corpos de prova foram cortados na fresa mecânica da Gonvarri S/A, que apresenta melhor resultado em termos de geração de rebarba quando comparado a prensa de cisalhamento da CSN-PR.

A tabela 13 mostra a seqüência operacional da preparação e realização dos ensaios e equipamentos / instrumentos utilizados.

TABELA 13 – Seqüência de operações da preparação e realização dos ensaios e equipamentos / instrumentos utilizados.

Ítem	Operação	Equipamento / Instrumento
1	Corte dos corpos de prova – para peso de revestimento	Prensa mecânica
2	Corte dos corpos de prova – para ensaio de tração	Fresa
3	Medição de espessura – corpos de prova para ensaio de tração	Micrômetro digital – precisão 0,001mm
4	Medição de largura – corpos de prova para ensaio de tração	Paquímetro analógico – precisão 0,05mm
5	Peso de Revestimento	Método Gravimétrico – utilização de solução de ácido clorídrico PA dissolvido em água para decapagem (50% v/v)
6	Decapagem dos corpos de prova para realização dos ensaios de tração	utilização de solução de ácido clorídrico PA dissolvido em água para decapagem (50% v/v)
7	Ensaio de Tração corpos de prova revestidos e decapados	Máquina de Tração Velocidades de deformação – 3mm/min entre 0 e 1,5% - 10m/min acima de 1,5% alongamento.

Todas as equações do 1º grau apresentadas nos gráficos e tabelas da seção “Resultados e Discussões” foram obtidas diretamente do Microsoft Excel que realiza ajustamento de curvas através do método dos mínimos quadrados. A mesma consideração se aplica aos valores de R^2 mostrados nos gráficos, que representam o coeficiente de determinação, que corresponde ao quadrado do coeficiente de correlação. (SPIEGEL, 1977).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES:

6.1 LIMITE DE ESCOAMENTO

As chapas revestidas com liga 55%Al-Zn apresentaram limite de escoamento superiores as chapas zincadas para toda a gama de espessura (entre 0,35 e 0,65mm) e para as três direções estudadas.

Para melhor entendimento e interpretação dos valores de limite de escoamento, utilizou-se o limite de escoamento específico que está relacionado com a espessura da tira de acordo com a equação abaixo:

$$LE_e = LE / e \quad (32)$$

onde:

LE_e = limite de escoamento específico (Mpa/mm);

LE = limite de escoamento (Mpa);

e = espesura da tira (mm).

Os valores de limite de escoamento específico para as chapas zincadas e Galvalume[®] apresentaram uma correlação muito boa com a espessura conforme mostrado na figura 14 considerando média entre as três direções estudadas.

Os valores do limite de escoamento específico em função da espessura para cada uma das três direções estudadas mostraram a mesma correlação apresentada na figura 14. Devido à boa correlação obtida, podemos representar o limite de escoamento específico em função da espessura da tira através de equações do 1º grau. Estas equações são apresentadas na tabela 14 para as três direções estudadas. Também são mostradas as equações que representam a variação do limite de escoamento específico (ΔLE_e) em função da espessura da tira.

FIGURA 14 – Representação gráfica do limite de escoamento específico em função da espessura para o Galvalume® e a chapa zincada considerando as três direções.

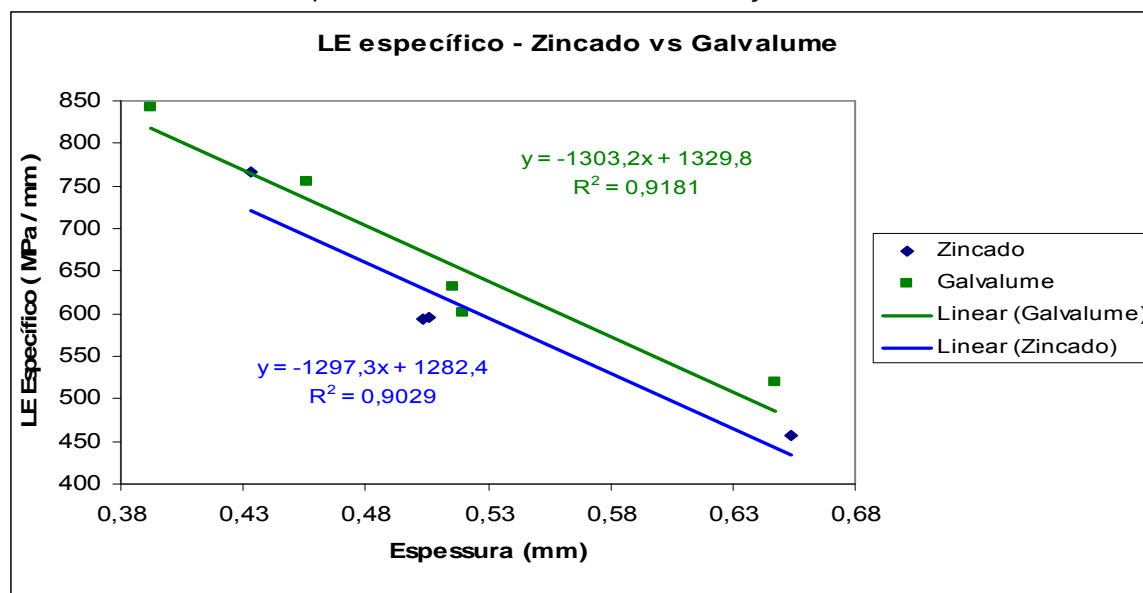


TABELA 14 – Equações para o limite de escoamento específico para o Galvalume® para as chapas zincadas e para a variação do LE_e em função da espessura.

Direção	Produto	Equação para LE_e	Equação para ΔLE_e
Longitudinal	Galvalume®	$LE_e = -1286,4 e + 1288$ (33)	$\Delta LE_e = -69,4 e + 85,8$ (39)
	Zincado	$LE_e = -1217,0 e + 1202,2$ (34)	
Transversal	Galvalume®	$LE_e = -1376 e + 1405,7$ (35)	$\Delta LE_e = -16,0 e + 49,3$ (40)
	Zincado	$LE_e = -1360 e + 1356,4$ (36)	
Diagonal	Galvalume®	$LE_e = -1244,3 e + 1294,4$ (37)	$\Delta LE_e = 68,1 e + 7$ (41)
	Zincado	$LE_e = -1312,4 e + 1287,4$ (38)	

Substituindo a equação (32) na equação (39) verifica-se que o Galvalume® de 0,50mm de espessura apresenta limite de escoamento 25,55MPa superior a chapa zincada, na direção longitudinal.

Ao comparar o limite de escoamento em cada uma das três direções, observou-se o seguinte comportamento para as chapas zincadas e Galvalume® no estado revestido e após remoção do revestimento:

$$LE_L < LE_D < LE_T \quad (42)$$

onde:

LE_L = Limite de escoamento na direção longitudinal;

LE_D = Limite de escoamento na direção diagonal;

LE_T = Limite de escoamento na direção transversal.

As figuras 15, 16, 17 e 18 mostram estas diferenças de limite de escoamento para as chapas zincadas e Galvalume® no estado revestido e decapado.

FIGURA 15 – Diferença do limite de escoamento para as três direções – aço zincado revestido. No gráfico D= diagonal, L =Longitudinal e T= Transversal.

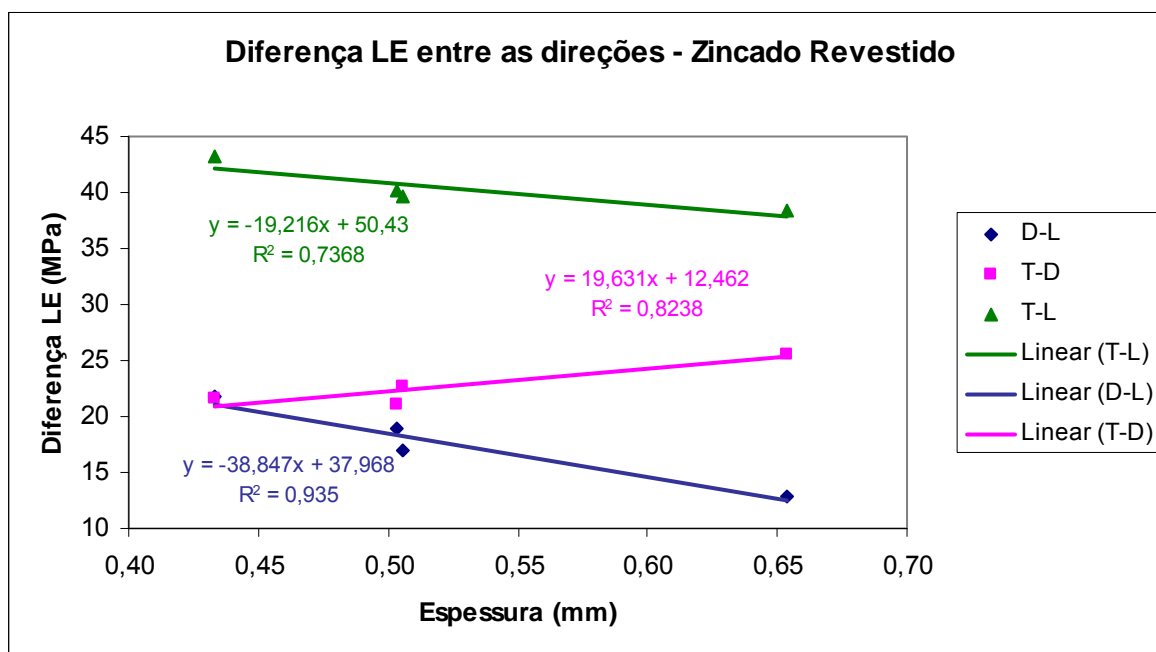


FIGURA 16 – Diferença do limite de escoamento para as três direções – aço zincado decapado. No gráfico D= diagonal, L =Longitudinal e T= Transversal.

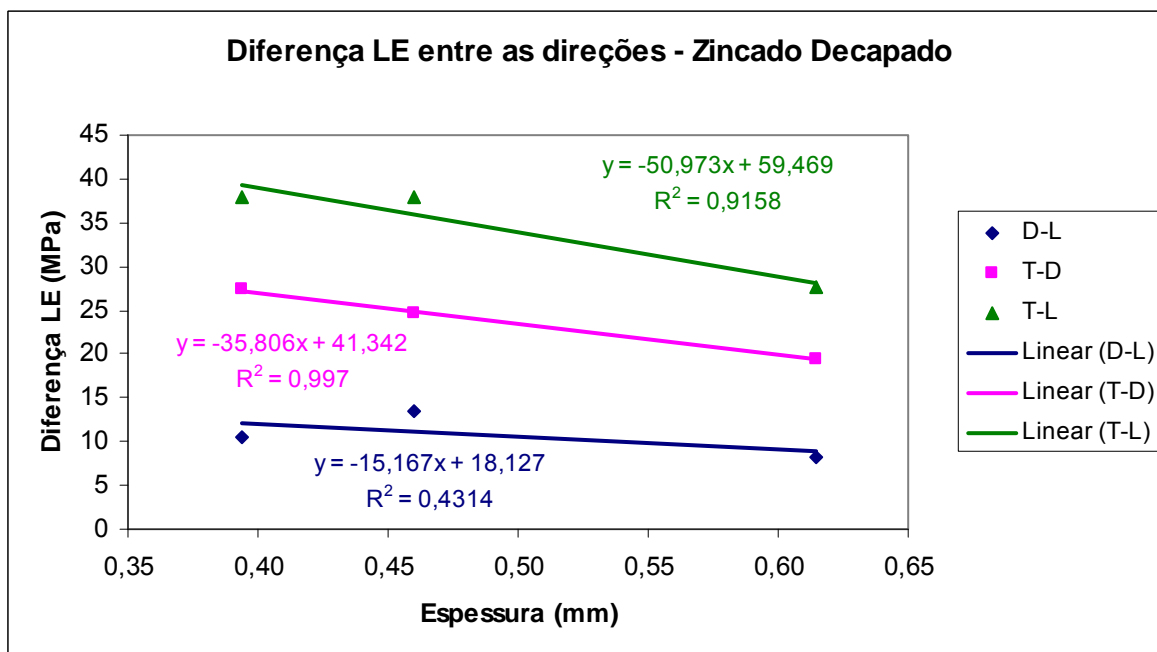


FIGURA 17 – Diferença do limite de escoamento para as três direções – Galvalume® revestido. No gráfico D= diagonal, L =Longitudinal e T= Transversal.

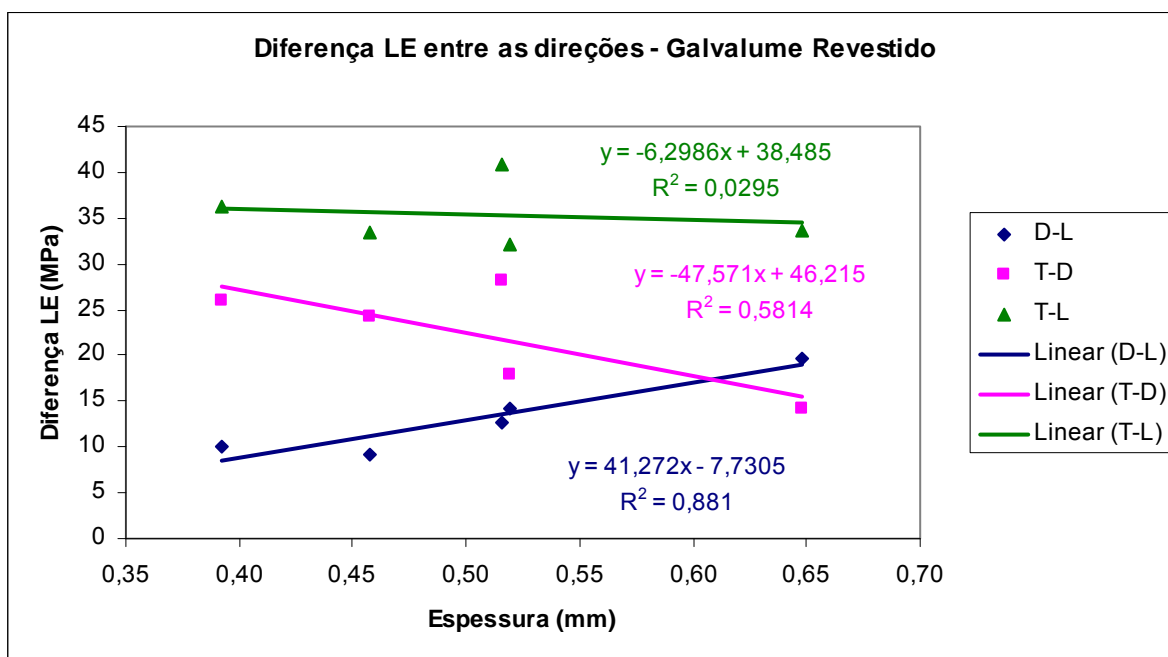
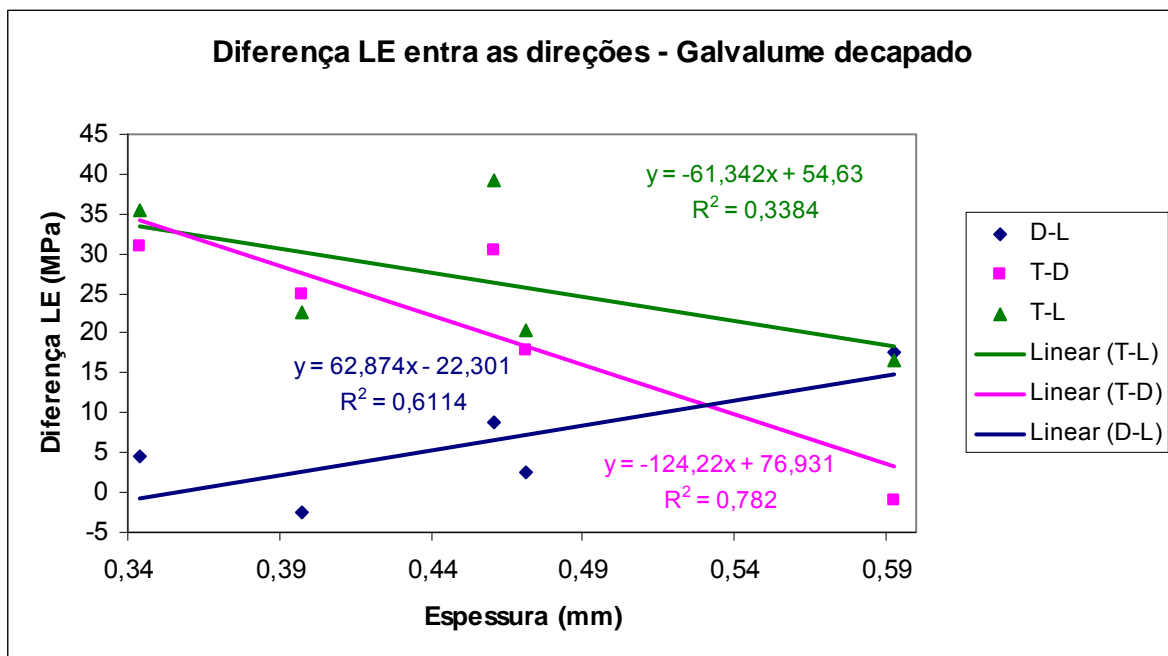


FIGURA 18 – Diferença do limite de escoamento para as três direções – Galvalume® decapado. No gráfico D= diagonal, L =Longitudinal e T= Transversal.



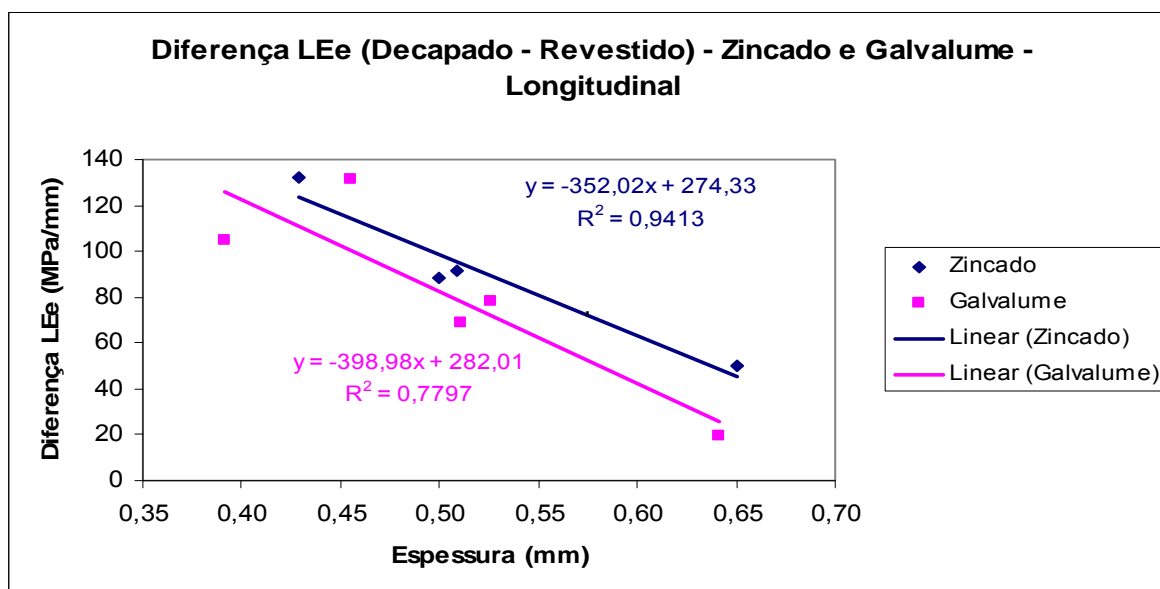
Em cada uma das direções estudadas, a curva tensão – deformação de engenharia mostrou um comportamento particular na região do escoamento. Este comportamento se mostrou similar para a chapa revestida e decapada, analisando-se a mesma direção.

Nas figuras acima, os gráficos (T-L) apresentam a diferença total do limite de escoamento, matematicamente correspondendo à soma entre (T-D) e (D-L). Os valores de (T-L) são bastante representativos correspondendo a até aproximadamente 15% do limite de escoamento das chapas analisadas. Como esperado a direção diagonal apresentou limite de escoamento intermediário entre as direções longitudinal e transversal.

As diferenças observadas para os diferentes limites de escoamento comprovam a necessidade de retirada de corpos de prova para ensaio de tração na direção transversal para obtenção do limite de escoamento de chapas para aplicação em estampagem e na direção longitudinal para aplicações estruturais. Estas direções de retirada de corpos de prova já são citadas nas normas técnicas dos materiais revestidos.

A figura 19 mostra a diferença do LE específico entre as chapas decapadas e revestidas para o aço zincado e o Galvalume® para a direção longitudinal.

FIGURA 19 – Diferença do limite de escoamento específico para o aço zincado e Galvalume® entre o estado decapado e revestido na direção longitudinal.



Pela análise da figura acima comprova-se que o revestimento de zinco apresentou maior influência do que o revestimento 55%Al-Zn na diminuição do LE específico das chapas revestidas comparadas com as chapas decapadas. Comportamento similar foi observado para as direções transversal e diagonal. Este gráfico nos mostra também que o LE_e do revestimento 55%Al-Zn está mais próximo do LE_e do aço do que o revestimento de zinco.

Como o revestimento aplicado às chapas de aço é consumido com o tempo e teoricamente não possui função estrutural, algumas normas técnicas (ASTM A924 e EN10142) solicitam o cálculo para a determinação do limite de escoamento utilizando-se apenas a espessura do aço base. Porém, como o revestimento de zinco ou 55%Al-Zn assim como o aço base, resiste a carga de tração sendo aplicada, estes revestimentos contribuem para o aumento do limite de escoamento.

Este acréscimo do limite de escoamento pode ser calculado através do desenvolvimento abaixo:

$$LE_b = LE_r \cdot (e_r / e_b) \quad (43)$$

onde:

LE_b = limite de escoamento considerando-se espessura do aço base (MPa);

LE_r = limite de escoamento considerando-se espessura revestida (MPa);

e_r = espessura revestida ou espessura total (mm);

e_b = espessura do aço base (mm).

$$\text{Como } e_r = e_b + e_{rev} \quad (44)$$

Substituindo a equação (44) na equação (43) obtemos:

$$\Delta LE = LE_b - LE_r = LE_r \cdot (e_{rev} / e_b) \quad (45)$$

onde:

ΔLE = acréscimo do limite de escoamento (MPa);

e_{rev} = espessura do revestimento (mm).

Pela análise da equação (45) comprova-se que o acréscimo do limite de escoamento é maior a medida que se aumenta a espessura do revestimento e se diminui a espessura do aço base.

O acréscimo do limite de escoamento pode ainda ser observado para o aço zincado e para o Galvalume® nas figuras 20 e 21 considerando média das três direções estudadas.

FIGURA 20 - Representação gráfica do limite de escoamento do aço zincado considerando espessura do aço base e espessura total. (média das três direções)

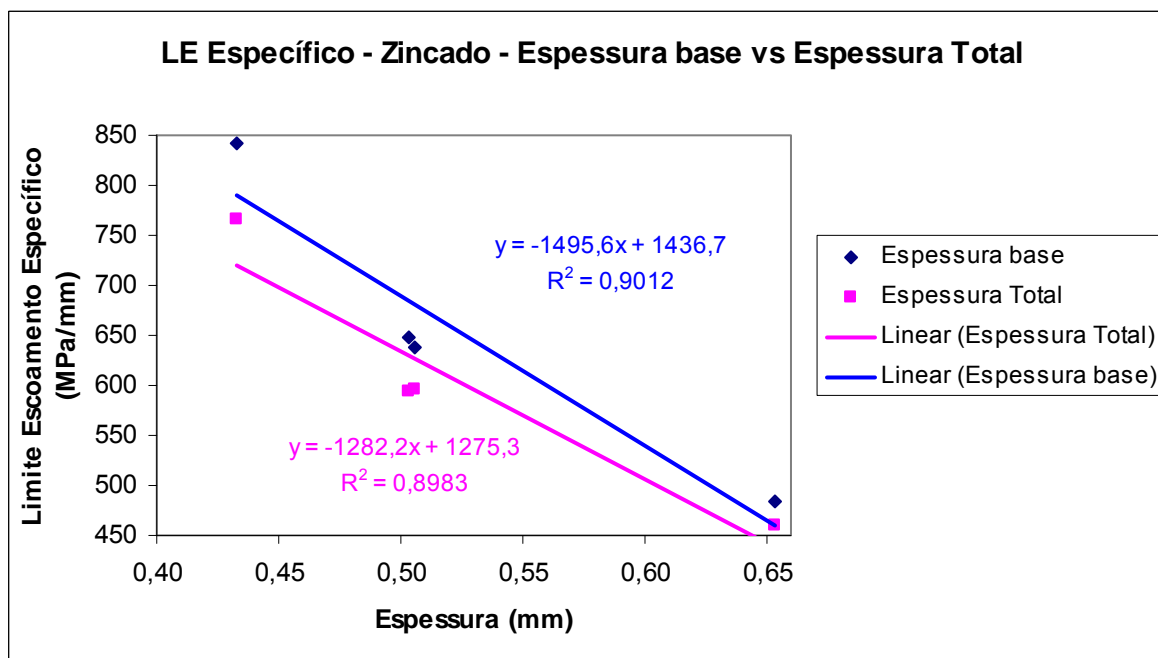
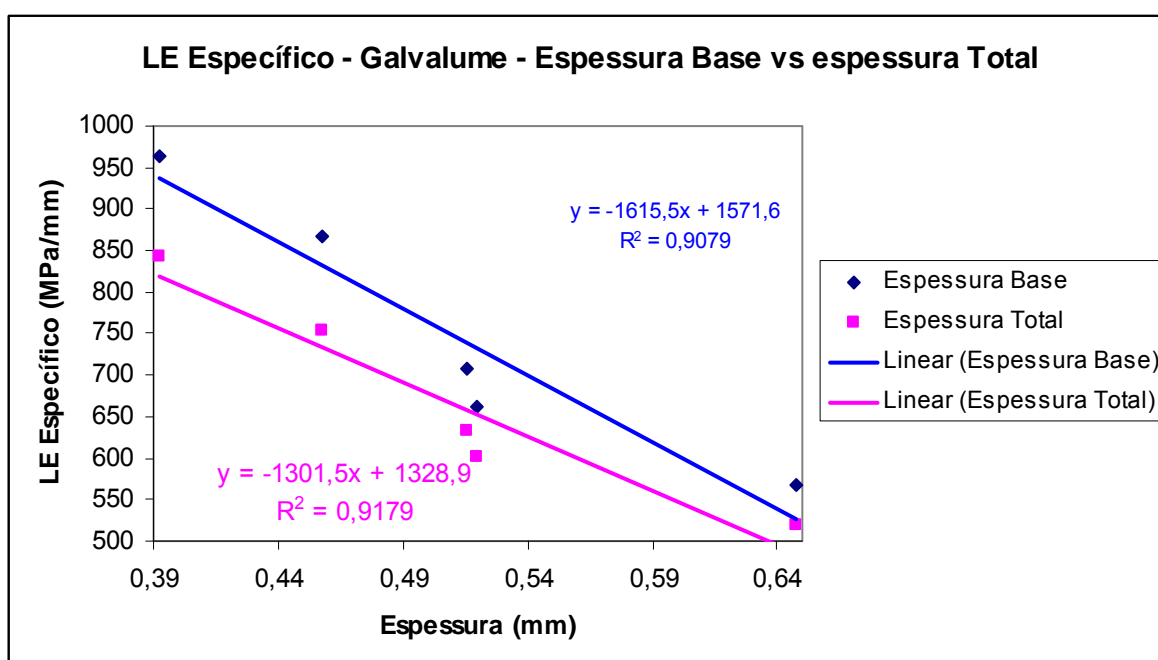


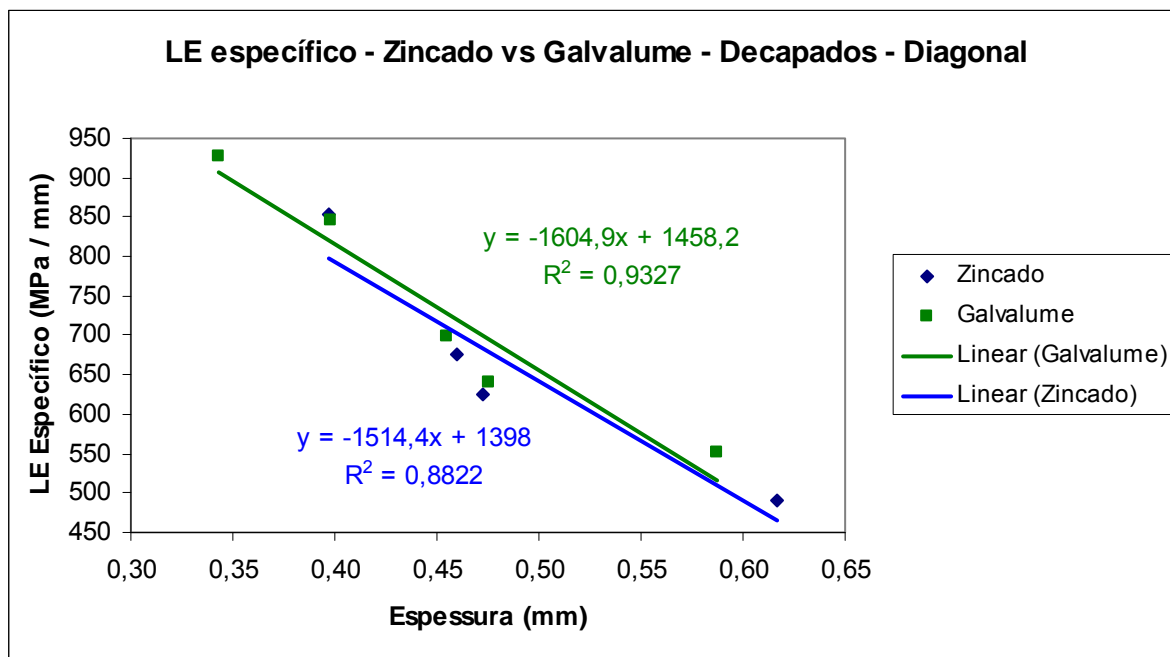
FIGURA 21 - Representação gráfica do limite de escoamento do Galvalume® considerando espessura do aço base e espessura total (média das três direções)



A figura 22 mostra o limite de escoamento específico para a chapa zincada e o Galvalume® decapados para a direção diagonal. Através da figura 22, quando se compara a chapa zincada com o Galvalume®, ambos decapados, nota-se que o Galvalume® decapado apresenta limite de escoamento ligeiramente superior à

chapa zincada decapada. Esta diferença comprova a ação da maior temperatura do banho 55%Al-Zn com relação ao banho de zinco e da elevada taxa de resfriamento do revestimento durante a produção de Galvalume®.

FIGURA 22 – Representação gráfica do limite de escoamento específico da chapa zincada e do Galvalume®, ambos decapados – direção diagonal.



6.2 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

As chapas revestidas com liga 55%Al-Zn (Galvalume®) apresentam limite de resistência superior as chapas zincadas para toda a gama de espessura (entre 0,35 e 0,65mm) e para as três direções estudadas.

Para melhor entendimento e interpretação dos valores de limite de resistência, utilizou-se o limite de resistência à tração específico que está relacionado com a espessura da tira de acordo com a equação abaixo:

$$LRT_e = LRT / e \quad (46)$$

onde:

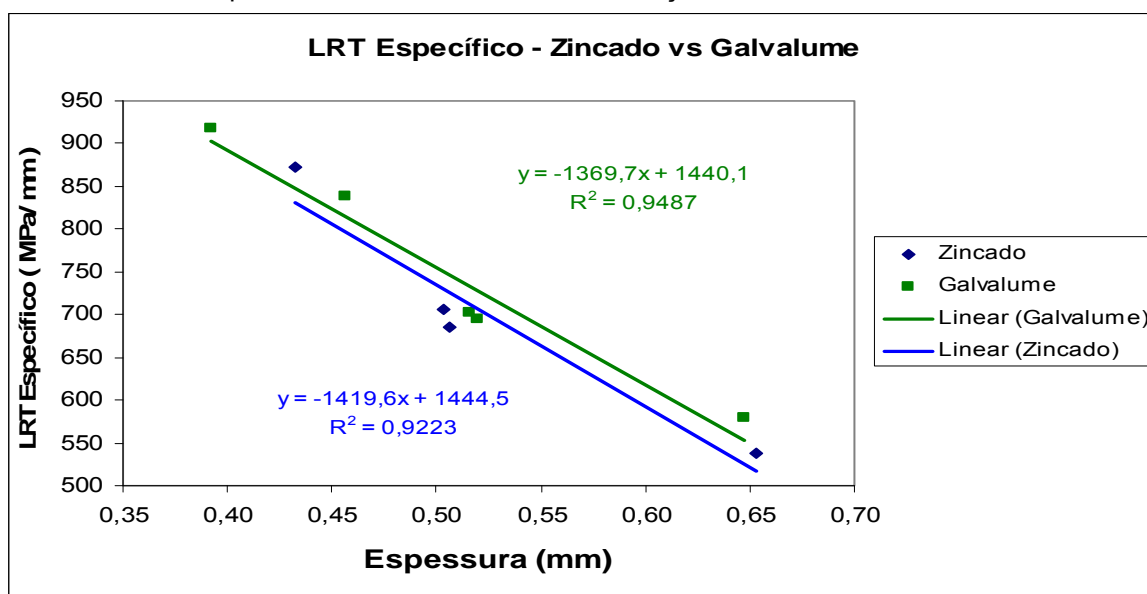
LRT_e = limite de resistência à tração específico (MPa/mm);

LRT = limite de escoamento;

e = espessura da tira (mm).

Os valores de limite de resistência específico para as chapas zincadas e Galvalume® apresentaram uma correlação muito boa com a espessura conforme mostrado na figura 23 considerando média entre as três direções estudadas.

FIGURA 23 – Representação gráfica do limite de resistência específico em função da espessura para o Galvalume® e a chapa zincada considerando as três direções.



Os gráficos representativos do limite de resistência específico em função da espessura para cada uma das três direções estudadas mostraram a mesma correlação apresentada na figura 23. Devido à boa correlação obtida, podemos representar esta propriedade em função da espessura da tira através de equações simples do 1º grau. Estas equações são apresentadas na tabela 15 para as três direções estudadas. Também são mostradas as equações que representam a variação do limite de resistência específico em função da espessura da tira.

TABELA 15 – Equações para o limite de resistência específico para o Galvalume® e as chapas zincadas e para a variação deste parâmetro em função da espessura.

Direção	Produto	Equação para LRT_e	Equação para ΔLRT_e
Longitudinal	Galvalume®	$LRT_e = -1400,3 e + 1450,9$ (47)	$\Delta LRT_e = 35,4 e + 2,5$ (53)
	Zinco	$LRT_e = -1435,7 e + 1448,4$ (48)	
Transversal	Galvalume®	$LRT_e = -1359,6 e + 1456,2$ (49)	$\Delta LRT_e = 74,7 e + 5,6$ (54)
	Zinco	$LRT_e = -1434,3 e + 1450,6$ (50)	
Diagonal	Galvalume®	$LRT_e = -1314,7 e + 1414$ (51)	$\Delta LRT_e = 75,3 e - 21,1$ (55)
	Zinco	$LRT_e = -1390 e + 1435,1$ (52)	

Substituindo a equação (46) na equação (53) descobrimos que o Galvalume® de 0,50mm de espessura apresenta limite de resistência 10,10MPa superior a chapa zincada, na direção longitudinal.

Podemos observar que a equação da variação do limite de resistência específico em função da espessura é crescente para todas as três direções estudadas.

Não se observou variações significativas do LRT entre as três direções estudadas para o material revestido e mesmo após decapado.

Realizando –se a decapagem das chapas revestidas e comparando seus valores de limite de resistência específico, observou-se que o aço decapado apresentou maior limite de resistência específico com relação a chapa revestida tanto para o aço zincado quanto para o Galvalume®. Este comportamento foi observado para as três direções estudadas conforme pode ser observado nas figuras 24 e 25.

FIGURA 24 – Diferença do limite de resistência específico para o aço zincado no estado revestido e decapado.

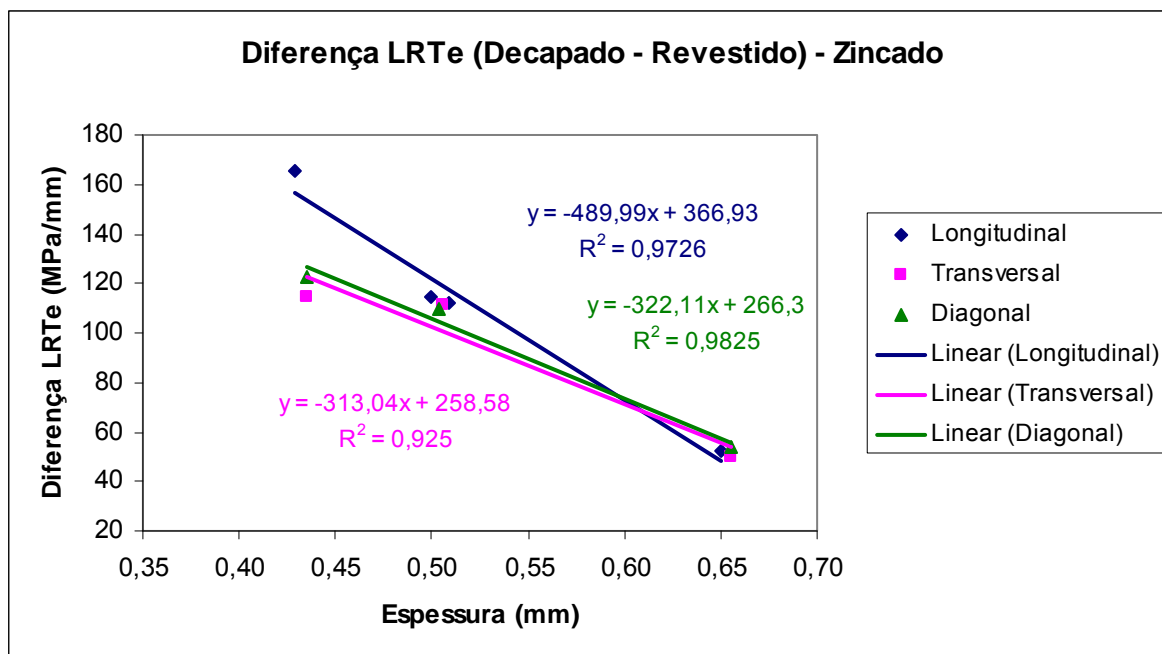
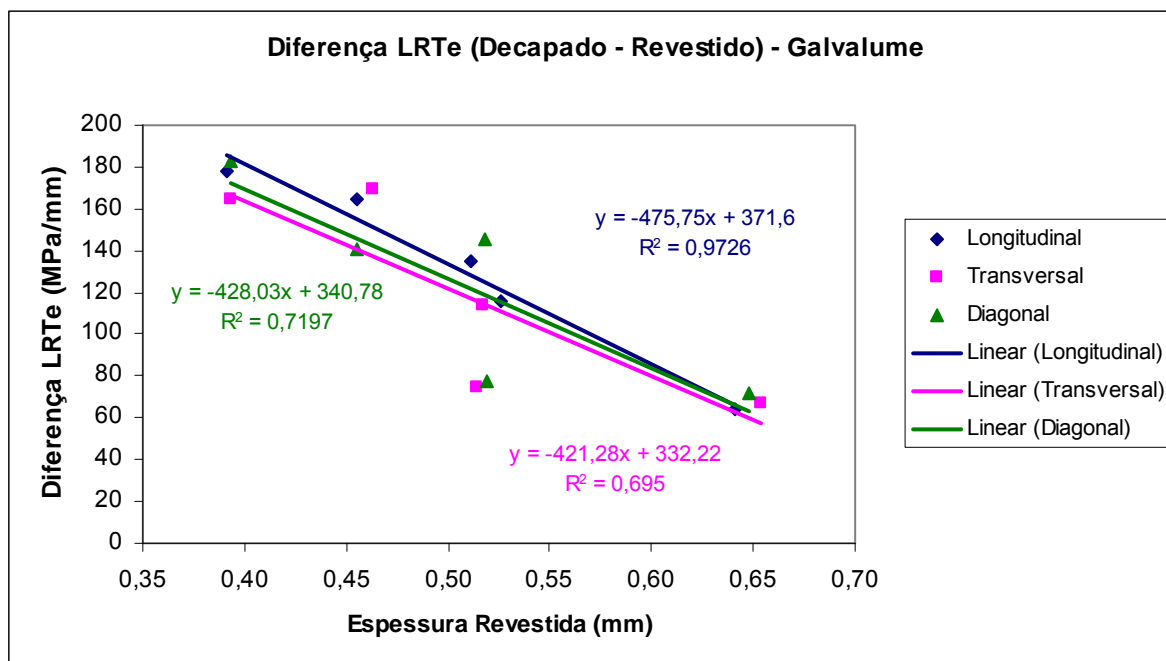


FIGURA 25 – Diferença do limite de resistência específico para o Galvalume® no estado revestido e decapado.



Observa-se nos gráficos que a diferença entre o limite de resistência do aço decapado e revestido diminui com o aumento da espessura, devido à diminuição da relação entre espessura de revestimento e a espessura do aço base.

Como o revestimento aplicado às chapas de aço é consumido com o tempo e teoricamente não possui função estrutural, algumas normas técnicas (ASTM A924 e EN10142) solicitam o cálculo para a determinação do limite de escoamento utilizando-se apenas a espessura do aço base. Dessa forma o revestimento de zinco ou 55%Al-Zn contribui para o aumento do limite de resistência à tração.

Este acréscimo do limite de resistência pode ser calculado através do desenvolvimento abaixo:

$$LRT_b = LRT_r \cdot (e_r / e_b) \quad (56)$$

onde:

LRT_b = limite de resistência à tração considerando-se espessura do aço base (MPa);

LRT_r = limite de resistência à tração considerando-se espessura revestida (MPa);

e_r = espessura revestida (mm);

e_b = espessura do aço base (mm).

$$\text{Como } e_r = e_d + e_{rev} \quad (57)$$

Substituindo a equação (57) na equação (56) obtemos:

$$\Delta LRT = LRT_b - LRT_r = LRT_r \cdot (e_{rev} / e_b) \quad (58)$$

onde:

ΔLRT = acréscimo do limite de resistência à tração (MPa);

e_{rev} = espessura do revestimento (mm).

Pela análise da equação (58) vemos que o acréscimo do limite de resistência é maior à medida que se aumenta a espessura do revestimento e se diminui a espessura do aço base.

O acréscimo do limite de resistência pode ainda ser observado para o aço zincado e para o Galvalume® nas figuras 26 e 27 considerando média das três direções estudadas.

FIGURA 26 - Representação gráfica do limite de resistência do aço zincado considerando espessura do aço base e espessura total. (Média das três direções)

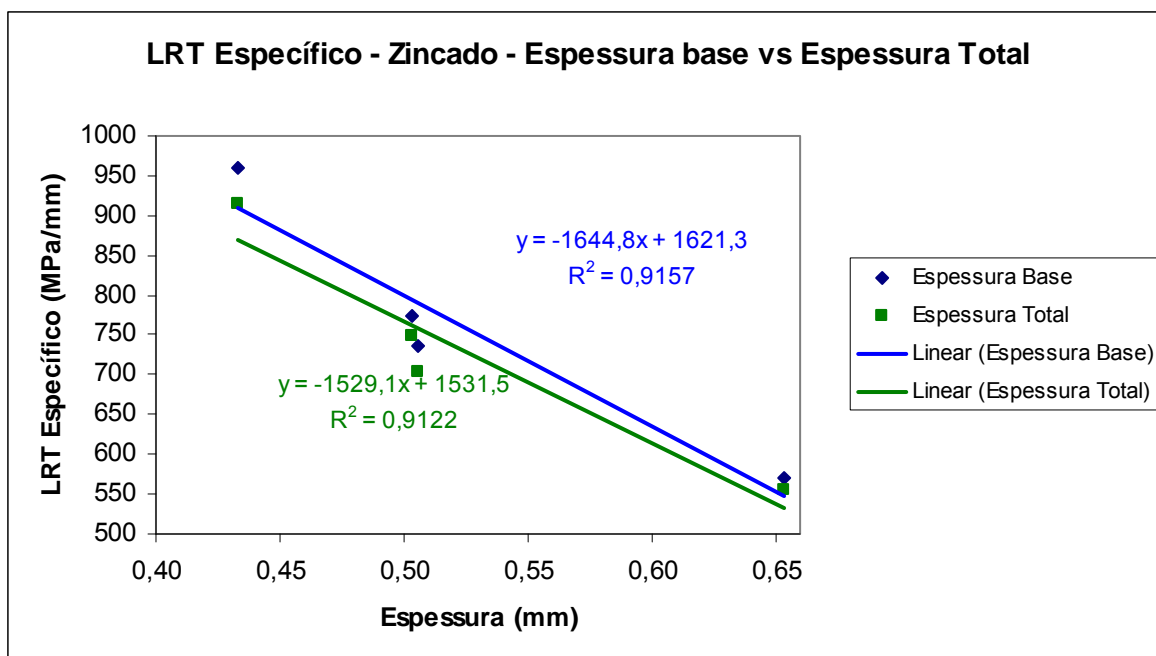
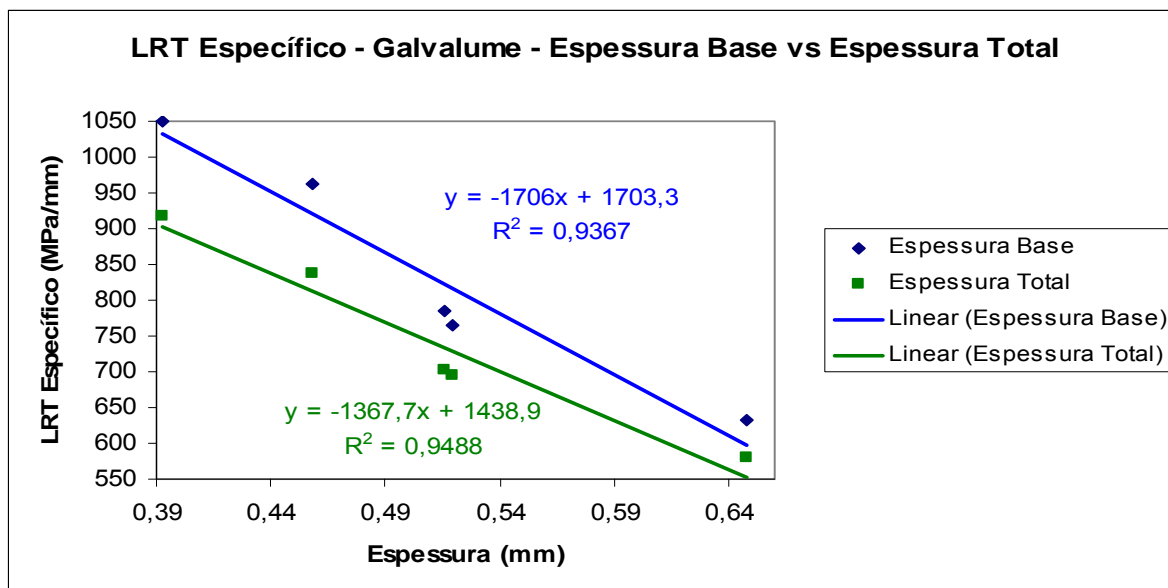
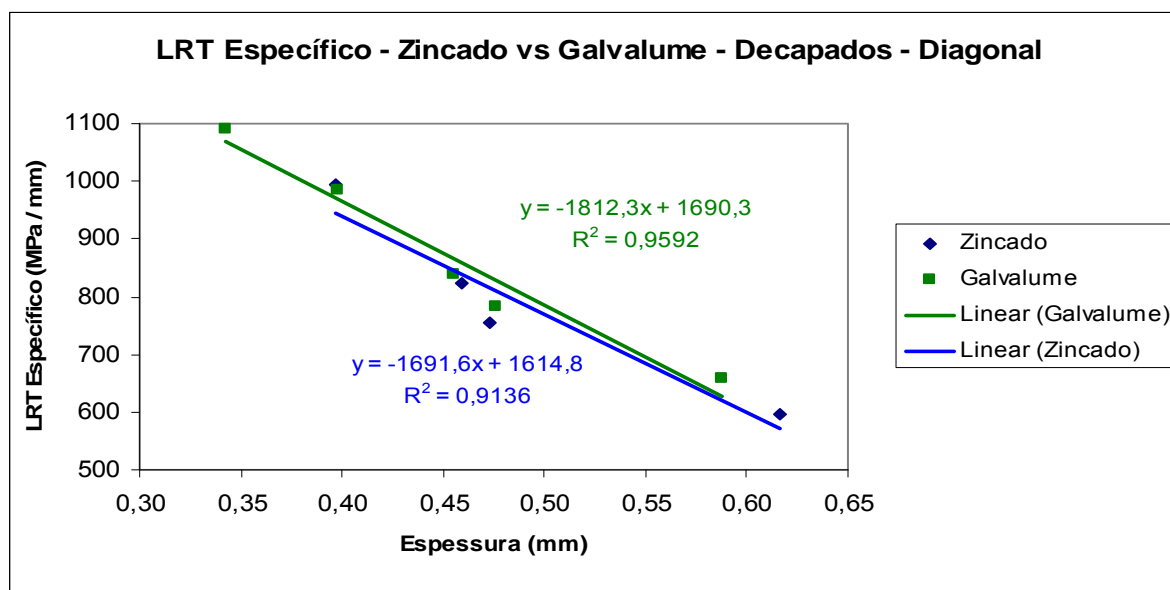


FIGURA 27 – Representação gráfica do limite de resistência do Galvalume® considerando espessura do aço base e espessura total (média das três direções)



Ao comparar a chapa zincada com o Galvalume®, após remoção do revestimento, foi verificado que o Galvalume® decapado apresentou limite de resistência ligeiramente superior à chapa zincada decapada comprovando a ação da temperatura do banho 55%Al-Zn e da elevada taxa de resfriamento do revestimento 55%Al-Zn. A figura 28 mostra o limite de resistência específico para a chapa zincada e o Galvalume® decapados para a direção diagonal.

FIGURA 28 – Representação gráfica do limite de resistência específico da chapa zincada e do Galvalume®, ambos decapados – direção diagonal.

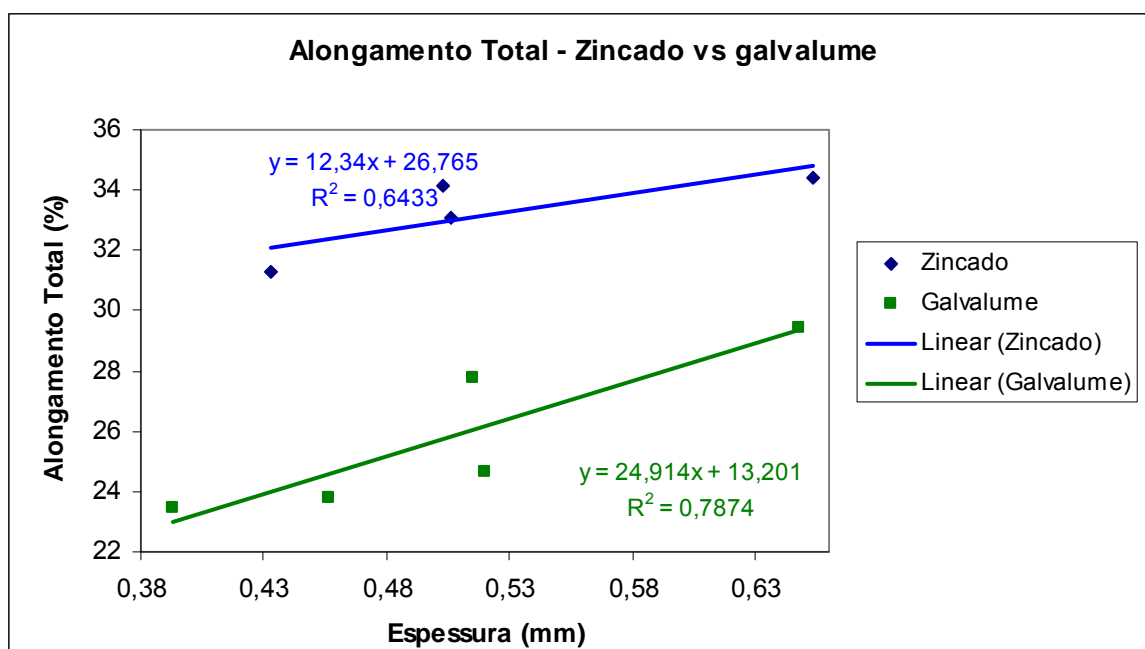


6.3 ALONGAMENTO TOTAL

As chapas zincadas apresentaram alongamento total superior às chapas revestidas com liga 55%Al-Zn para toda a gama de espessuras (0,35 a 0,65mm) e para as três direções estudadas.

Os valores de alongamento total para as chapas zincadas e Galvalume® apresentaram uma correlação razoável com a espessura conforme mostrado na figura 29 considerando média entre as três direções estudadas.

FIGURA 29 – Representação gráfica dos valores de alongamento total para as chapas zincadas e Galvalume® – média das três direções.



As equações encontradas para as retas apresentadas na figura 29 e reescritas abaixo são:

$$\varepsilon_{Zn} = 12,34 e + 26,765 \quad (59)$$

$$\varepsilon_{GL} = 24,914 e + 13,201 \quad (60)$$

onde:

ε_{Zn} = alongamento total da chapa zincada (%);

ε_{GL} = alongamento total do Galvalume® (%).

A equação (61) representa a diferença entre as equações (59) e (60) e equivale à diferença entre o alongamento total das chapas zincadas e o Galvalume® em função da espessura.

$$\Delta\varepsilon = -12,574 e + 13,564 \quad (61)$$

onde:

$\Delta\varepsilon$ = diferença de alongamento total entre o Galvalume® e a chapa zincada (%).

Através da equação acima calculamos que para espessura de 0,50mm, a chapa zincada apresenta alongamento total 7,27% acima do alongamento total do Galvalume®.

As chapas decapadas apresentaram alongamento total superior às chapas revestidas tanto para as chapas zincadas quanto o Galvalume®, conforme pode ser comprovado nas figuras 30 e 31, mostrando que a presença do revestimento possui papel detrimental no alongamento total das chapas zincadas e do galvalme®. Verifica-se que este papel detrimental do revestimento sobre o alongamento total das chapas é maior para o revestimento 55%Al-Zn em relação ao revestimento zincado.

Figura 30 – Representação gráfica dos valores de alongamento total para as chapas zincadas revestidas e decapadas para a direção transversal.

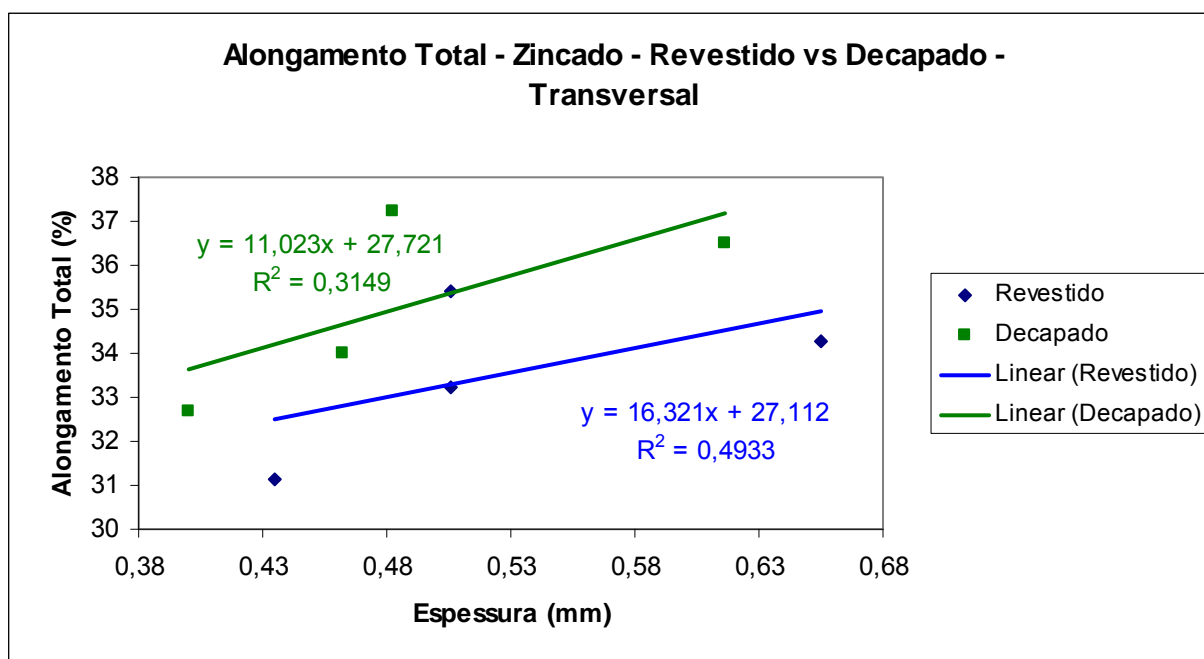
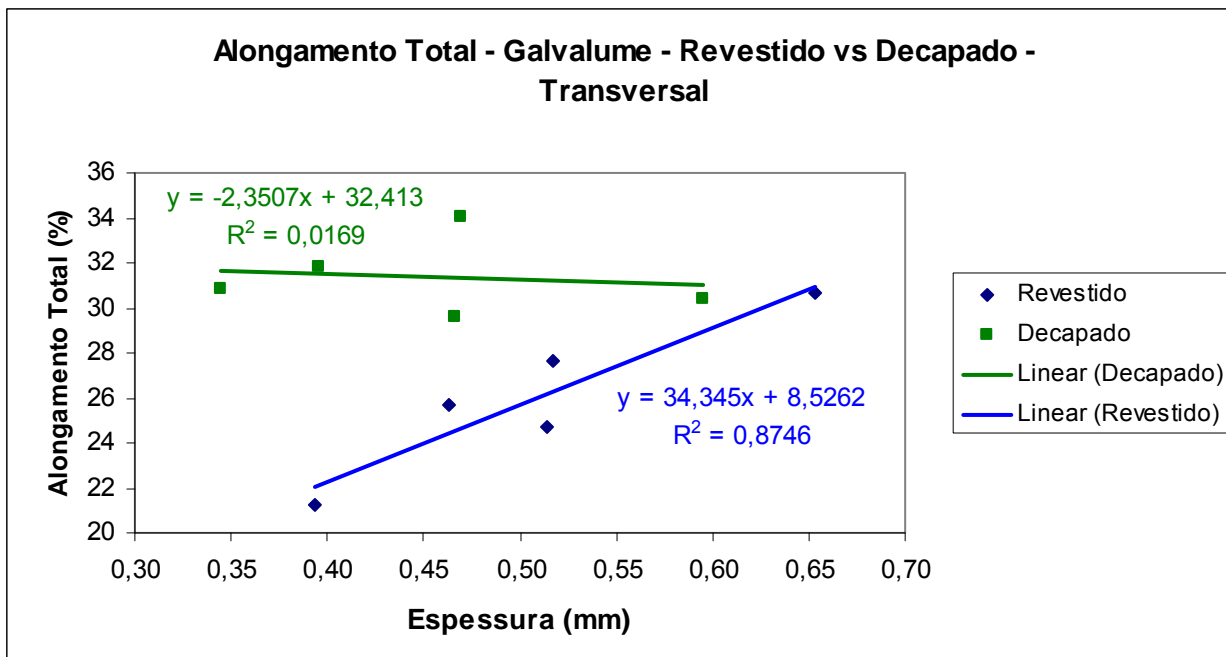
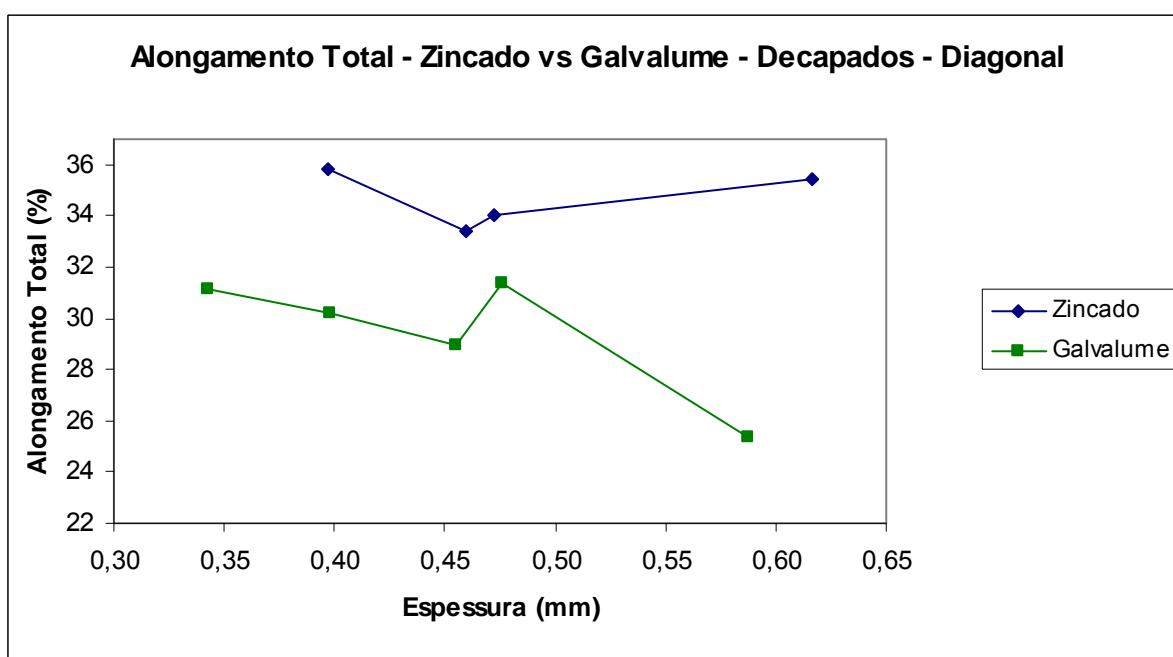


Figura 31 – Representação gráfica dos valores de alongamento total para o Galvalume® revestido e decapado para a direção transversal.



Analisando-se a figura 32 verificamos a influência do ciclo térmico de processamento da chapa zincada e do Galvalume® sobre o alongamento total do aço base. A maior temperatura do banho 55%Al-Zn e a taxa elevada de resfriamento do revestimento levam a menores valores de alongamento total para o Galvalume® decapado com relação à chapa zincada decapada.

FIGURA 32 – Representação gráfica dos valores de alongamento total para as chapas zincadas e Galvalume® decapados para a direção transversal.

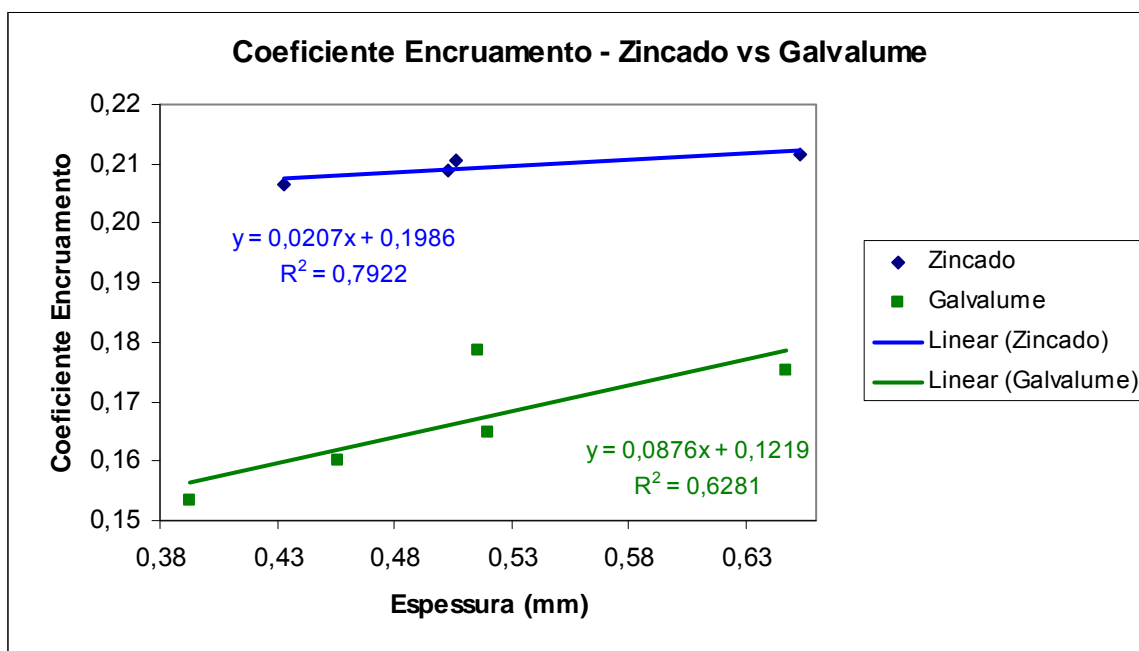


6.4 COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO

As chapas zincadas apresentaram coeficiente de encruamento superior ao das chapas revestidas com liga 55%Al-Zn para toda a gama de espessura e para as três direções estudadas.

Assim como observado para o limite de escoamento e limite de resistência, foi observada boa correlação entre o coeficiente de encruamento e a espessura da tira para todas as três direções estudadas e para a média das três direções, conforme pode ser observado na figura 33.

Figura 33 – Representação gráfica dos valores de coeficiente de encruamento para as chapas zincadas e Galvalume® – média das três direções.



Não foram observadas grandes diferenças entre os valores do coeficiente de encruamento das chapas zincadas revestidas e decapadas. A mesma observação se aplica entre as chapas zincadas e o Galvalume® ambos no estado decapado.

Porém, foi observada variação considerável entre o coeficiente de encruamento entre o Galvalume® revestido e decapado para as três direções estudadas conforme pode ser observado pelas figuras 34 e 35 indicando que o revestimento 55%Al-Zn apresenta papel detrimental considerável no coeficiente de encruamento.

FIGURA 34 – Representação gráfica dos valores de coeficiente de encruamento para o Galvalume® revestido e decapado – direção transversal.

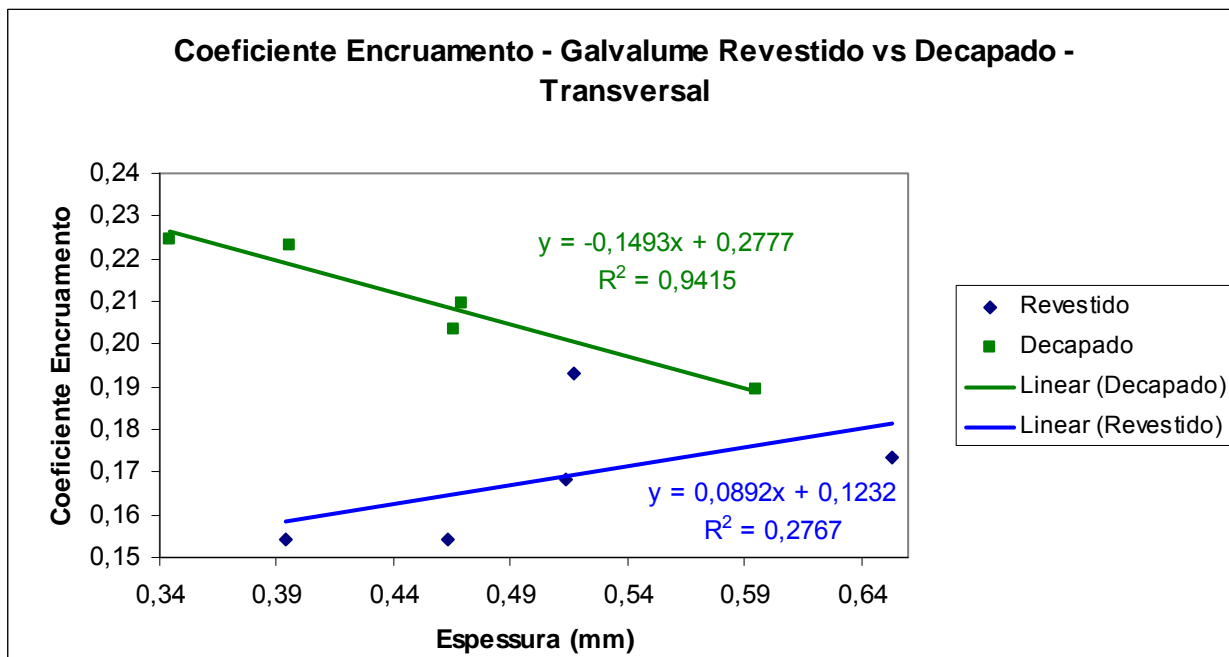
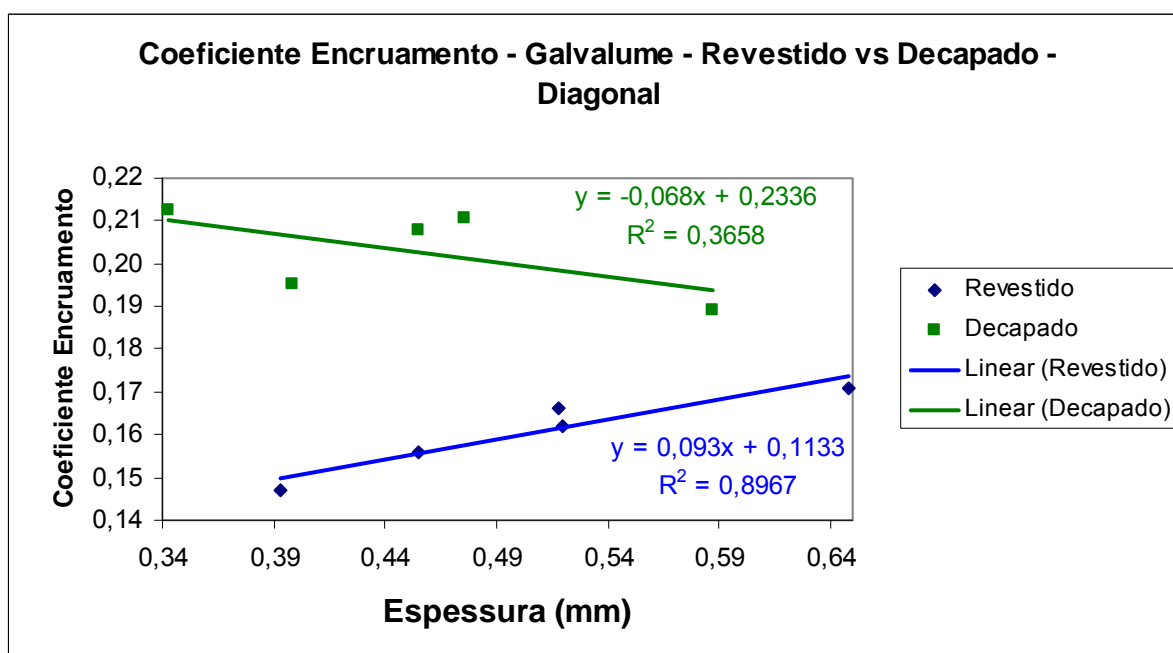


FIGURA 35 – Representação gráfica dos valores de coeficiente de encruamento para o Galvalume® revestido e decapado – direção diagonal.



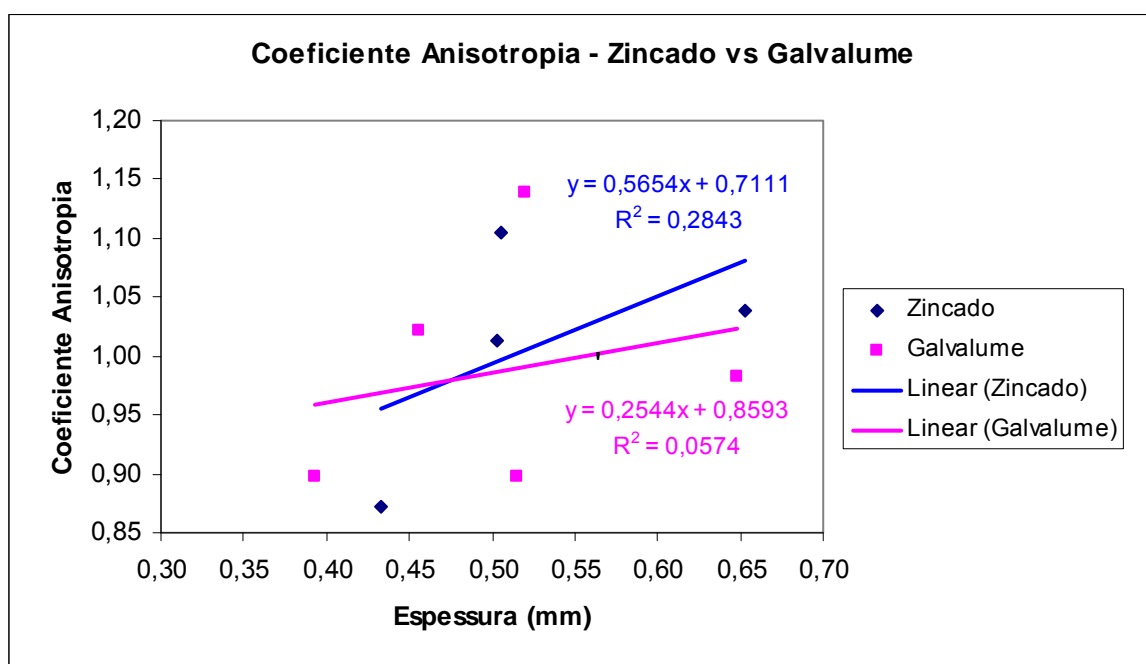
Considerando as equações apresentadas na figura 34 e 35 encontramos diferença de 0,0342 entre o coeficiente de encruamento entre a chapa revestida e decapada, considerando-se espessura 0,50mm, para a direção transversal e 0,0398 para a direção diagonal.

Observa-se também que o coeficiente de encruamento para a chapa revestida aumenta à medida que aumenta a espessura devido a menor relação e_{rev}/e_r .

6.5 COEFICIENTE DE ANISOTROPIA

Os dados obtidos para o coeficiente de anisotropia aparentemente não apresentam correlação com a espessura da tira e não se pode tirar conclusões relativas a diferenças entre o Galvalume® e o aço zincado. Foi observada grande variação dos valores de coeficiente de anisotropia mesmo estudando-se a mesma espessura e direção. A figura 36 mostra os valores do coeficiente de anisotropia para o Galvalume® e o aço zincado considerando-se média entre as três direções.

FIGURA 36 – Coeficiente de anisotropia para as chapas zincadas e Galvalume® (média entre as três direções estudadas).



7 CONCLUSÕES:

As chapas revestidas com a liga 55%Al-Zn apresentaram limite de escoamento específico e limite de resistência à tração específicos superiores e alongamento total e coeficiente de encruamento inferiores comparadas às chapas zincadas para toda a gama de espessuras estudadas (entre 0,35 e 0,65mm) e direções estudadas. Devido a boa correlação encontrada entre o limite de escoamento específico, limite de resistência específico, alongamento total e coeficiente de encruamento em função da espessura da tira, estas propriedades podem ser bem representadas por equações do 1º grau em função da espessura.

Foi observada diferença entre o limite de escoamento entre as três direções estudadas para o aço zinco e o Galvalume®, tanto no estado revestido como decapado. Foi verificado limite de escoamento maior na direção transversal com relação à direção longitudinal. A direção diagonal apresentou limite de escoamento intermediário como esperado.

Em comparação entre chapas zincadas e o Galvalume®, ambos decapados, verificou-se que o Galvalume® tende a apresentar maior limite de escoamento, maior limite de resistência à tração, menor alongamento total e menor coeficiente de encruamento quando comparado as chapas zincadas. Este resultado comprova a influência das diferentes temperaturas dos banhos metálicos e diferentes taxas de resfriamento dos revestimentos nas propriedades mecânicas do aço base.

As chapas revestidas com zinco ou revestimento 55%Al-Zn apresentam limite de escoamento e limite de resistência à tração específicos inferiores às chapas após remoção do revestimento. A diferença entre o estado decapado e revestido é maior à medida que se diminui a espessura do aço base.

Quando se calcula o valor do limite de escoamento e limite de resistência à tração dos produtos revestidos, considerando-se apenas a seção transversal do aço base, verifica-se maior acréscimo destas propriedades para revestimento 55%Al-Zn comparado ao revestimento de zinco. Isso comprova que o revestimento 55%Al-Zn tende a apresentar limite de escoamento e limite de resistência à tração superiores ao revestimento de zinco.

Os dados de coeficiente de anisotropia não são conclusivos e nenhuma correlação foi encontrada devido a grande variação dos valores encontrados mesmo para os corpos de prova de mesmas espessuras e direções.

Todas as chapas analisadas, tanto zincadas quanto Galvalume[®], apresentaram propriedades mecânicas em conformidade com as normas técnicas específicas.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para confirmação das correlações encontradas para as propriedades mecânicas do aço zincado e Galvalume[®] produzidos na CSN-PR sugere-se coleta maior de corpos de prova e estudo de uma faixa maior de espessuras, particularmente para a análise do coeficiente de anisotropia. Seria interessante também a investigação da influência de diferentes espessuras de revestimento nas propriedades mecânicas dos produtos revestidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E 8: **Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, 2000.

ASTM. A 90: **Standard Test Method for Weight of Coating on Zinc-Coated (Galvanized) Iron or Steel Articles**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.06, ASTM, 1993.

ASTM E 517: **Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Materials**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, 2000.

ASTM. A 525: **Standard Specification for Steel Sheet, Zinc Coated (Galvanized) by Hot-Dip Process**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.06, ASTM, 1993.

ASTM E 646: **Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials**, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, 2000.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – an Introduction**, 5th edition, 2000.

CARVALHO, J. E. R. de.; LINS, M. F. G.; SEIXAS, U. R.; NOGUEIRA, M. S. N. **Tratamento químico em chapas de aço galvanizadas: Necessidade ou Conveniência?** In: XXXIV Seminário de Laminação da COLAM/ABM, 1997, Belo Horizonte.

CONI, N. H. S., MACHADO, W. F., SILVA, P. C., RAMOS, A. M. G & PINHO, J. G. S, 2002, **Linha de galvanização contínua da CISA-CSN**, 39º Seminário de laminação, Outubro 23- 25, Ouro Preto, vol.1, pp. 275- 284.

CONI, N. H. S. da. **Estudo da influência dos ciclos térmicos na estrutura metalográfica e dureza de chapas de aço baixo carbono laminadas a frio**. Curitiba, 2002. 20f. Trabalho de Pós-Graduação (Disciplina Técnicas Experimentais em Metalurgia) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.

HOWE, P.; KELLEY, S. C. **A Comparison of the Resistance Spot Weldability of Bare, Hot-Dipped, Galvannealed and Electrogalvanized DQSK Sheet Steels**, Paper 880280, Society of Automotive Engineers, 1988.

LOBÃO, M. C. et al. **Determinação de curvas Limite de Conformação por Procedimentos Experimentais e Simulação Numérica do Processo de Estampagem**, In: VI Seminário Nacional de Conformação de Chapas. p.57

OTSUKA, K; ARAI, M.; KASAI, S. **Development of Dross Control Methods in a Continuous Galvanizing Pot by Numerical Bath Flow Analyses**. In: 4th

International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech'98), 1998, Chiba, Japan, The iron and Steel Institute of Japan.

REED-HILL, R. E. **Physical Metallurgy Principles**, p 230- 233, 1982

SMS-DEMAG - **Technical Specification of CISA-CSN Continuous Galvanizing Line**; EUA, 2002.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977.

TIERRA, P ; BERNAL, M; **Comparative Study on Heat Resistance of Hot Dip Coatings**.

TOWNSEND, H. E.; ZOCCOLA, J. C. **Materials Performance**, Vol 10, 1979, p 13-20.

TOWNSEND, H. E. **Continuous Hot Dip Coatings**, ASM Handbook, vol 5 -Surface Engineering, pp.339 – 348, 1993.

55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Operating Technology Manual; BIEC International Inc, BHP Steel, Austrália, 1994.

55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Research and Technology Manual; BIEC International Inc, BHP Steel, Austrália, 1994.

55% Aluminium-zinc Coated Sheet Steel Marketing Manual, BIEC International Inc, BHP Steel, Austrália, 1994.